

一起 35kV 变压器单相高压绕组短路故障分析

严国平¹，汤大海²，陈永明²，陈恒祥³，孙东杰²，马海薇²，

陈 燕²，曹 斌²，刘沪平³

(1.国网江苏省电力公司，江苏 南京 210024；2.国网镇江供电公司，江苏 镇江 212001；
3.国网南京供电公司，江苏 南京 210019)

摘 要：针对某 35kV 变电所变压器发生的一起 A 相高压绕组短路故障造成 35kV 变压器差动保护动作跳闸的现象，以变电所设备参数和保护装置的故障录波为参考，进行了短路电流理论分析，推导出短路电流计算公式并进行短路电流反演计算。理论分析和短路电流计算结果与故障录波图提供的信息相一致，从而证实了 35kV 变压器差动保护的动作为正确的。

关键词：35kV 不接地系统；35kV 变压器；单相高压绕组短路；差动保护；动作行为；分析

2013 年 3 月 12 日，某电网某 35kV 变电所发生了一起 35kV 变压器 A 相高压绕组引线与中性点套管桩头之间的短路故障。变压器容量为 10MVA，型号为 SFZ9-10000/35，接线组别为 YNd11，变压比为 35kV/10kV，2002-05-28 投运。故障时 B 相与 C 相电流大小相等相位一致，而 A 相电流大小为 B 相或 C 相电流的 2 倍，相位与 B 相或 C 相电流反相；该故障造成了该变压器差动速断和比

率差动保护动作，跳开变压器高、低压断路器切除故障；上级 35kV 电源线路断路器保护动作跳闸，重合成功。变压器绕组引线之间发生相间故障或单相接地故障比较常见^[1~5]，但变压器某相绕组引线与中性点套管桩头之间发生短路故障却不常见，也没有文献记载，现分析如下。

1 事故经过及继电保护动作情况

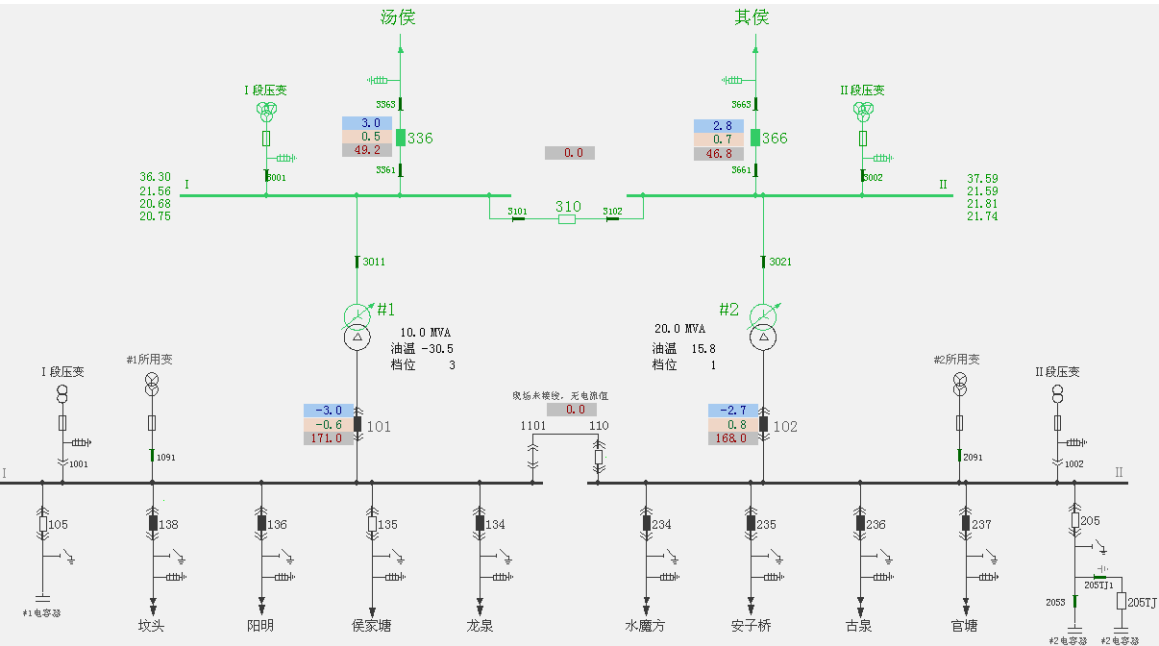


图 1 故障前系统一次接线图

1.1 事故发生经过及继电保护动作情况

2013 年 3 月 12 日 21 点 04 分，侯家塘 35kV

变电所 1 号变压器发生故障，1 号变压器差动保护动作，跳开变压器高、低压断路器切除故障；1 号

变压器故障跳闸，致使 10kV I 段母线失去电源，10kV 备自投动作，合上 10kV 分段 100 断路器，10kV I 段母线由 2 号变压器转供。

1.2 事故时系统运行方式

故障前系统一次接线图见图 1。故障前，侯家塘变电所 35kV 汤侯 336 断路器、35kV 其侯 366 断路器运行，35kV 内桥 310 断路器热备用，35kV 备自投启用；1 号变压器 10kV 侧 101 断路器带 10kV I 段母线；2 号变压器 10kV 侧 102 断路器带 10kV II 段母线。10kV 分段 110 断路器热备用，两台主变分列运行，10kV 备自投启用。35kV 系统为不接地系统。

1.3 故障时天气情况

气象报告表示 3 月 12 日天气为中雨转阴，温度为 6~15℃。当晚 21 时左右，该地区突降大雨，并伴有 7 级大风，阵风 8~9 级，气象条件恶劣。

2 故障检查情况

故障发生后，某公司相关人员迅速到达现场，并组织开展故障查找和分析工作，针对 1 号变压器本体进行油色谱采样分析，结果无明显异常。对 1 号变压器进行了诊断性试验，包括：直流电阻、本体介质损耗及电容量、绝缘电阻、低电压短路阻抗、分接开关波形等进行检测，变压器各项试验数据合格；对 1 号变压器差动保护范围内的相关一次设备，经外观检查，未见明显异常。对汤侯线 336 断路器套管电流互感器（简称 TA）进行变比试验和伏安特性试验，各项试验数据正常。对 1 号变压器变 10kV 侧 101 断路器柜进行开柜检查，断路器和 TA 等设备检查无异常。对 1 号变压器差动保护进行校验，试验结果正常。

经对 1 号变压器外观进行检查，发现 1 号变压器 35kV 侧中性点套管瓷件最上层伞裙表面局部有严重的放电灼伤痕迹，与变压器 35kV 侧 A 相套管的引线形成了放电通道，如图 2 所示（图示红线所示为异物形成的放电通道）。

同时，1 号变压器 35kV 侧 A 相套管的线夹及引线靠近中性点套管的这一侧也有明显的放电灼伤痕迹，如图 3 所示。1 号变压器 35kV 侧 A 相套管与中性点套管带电部分的实测最小净距为 405mm，满足规程规定的安全距离要求。由上述检查情况可以判断，故障点位置为 1 号变压器

35kV 侧中性点套管桩头与 35kV 侧 A 相套管的引线由于异物形成了短路（放电）。



图 2 1 号变压器中性点套管放电痕迹照片



图 3 1 号变压器 35kV 侧 A 相套管引线放电痕迹照片

3 短路电流和保护动作行为分析

3.1 故障录波情况

故障发生后，继电保护专业人员调阅了 1 号主变保护装置和动作记录，保护装置动作报文信息如下：

04 分 22 秒 827 毫秒，侯家塘变 1 号变压器 A 相差动速断保护动作（动作值 $I_{DA}=19.16A$ ，差动速断保护整定值 19A，比率差动保护整定值 1.43A，TA 变比为 600/5）；

04 分 22 秒 829 毫秒，侯家塘变 1 号变压器 A 相比率差动动作；

04 分 23 秒 336 毫秒，侯家塘变汤侯线 336 断路器分闸；

04 分 23 秒 358 毫秒，侯家塘变 1 号变压器低压侧 101 断路器分闸；

04 分 23 秒 553 毫秒，侯家塘变 1 号电容器 105 断路器分闸；

04 分 28 秒 033 毫秒，侯家塘变 10kV 备自投

动作;

04分28秒109毫秒,侯家塘变10kV母联110断路器合闸;10kV I段母线由2号变压器转供电。

调阅了1号变压器35kV侧后备保护录波波形见图4。图4中,从上到下分别为1号变压器35kV侧后备保护A相、B相、C相电流(I_A 、 I_B 、 I_C)和A相、B相、C相电压(U_A 、 U_B 、 U_C),及3倍零序电压($3U_0$)和3倍零序电流($3I_0$)。

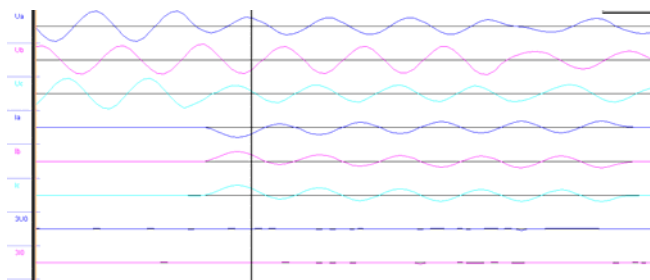


图4 1号变压器35kV侧后备保护录波波形图

由图4的故障录波波形可以看出,故障时,B相和C相电流同相且大小相等,而A相电流与B相和C相电流反相且大小与B相和C相电流之和相等。由保护动作信息和故障录波可知,差动保护的差动速断整定值19A,而差动差流电流值为19.16A,超过定值,故差动速断保护动作(2ms后比率差动保护动作),启动336和101断路器跳闸,切除故障。故障持续了约5个周波100ms。

同时,1号变压器35kV侧A相套管的线夹及引线靠近中性点套管的这一侧也有明显的放电灼伤痕迹,见图3。1号变压器35kV侧A相套管与中性点套管带电部分的实测最小净距为405mm,满足规程规定的安全距离要求。由上述检查情况可以判断,故障点位置为1号变压器35kV侧中性点套管桩头与35kV侧A相套管的引线由于异物形成了短路(放电)。

3 短路电流和保护动作行为分析

3.1 故障录波情况

故障发生后,继电保护专业人员调阅了1号主变保护装置和动作记录,保护装置动作报文信息如下:

04分22秒827毫秒,侯家塘变1号变压器A相差动速断保护动作(动作值 $I_{DA}=19.16A$,差动速断保护整定值19A,比率差动保护整定值

1.43A,TA变比为600/5);

04分22秒829毫秒,侯家塘变1号变压器A相比率差动动作;

04分23秒336毫秒,侯家塘变汤侯线336断路器分闸;

04分23秒358毫秒,侯家塘变1号变压器低压侧101断路器分闸;

04分23秒553毫秒,侯家塘变1号电容器105断路器分闸;

04分28秒033毫秒,侯家塘变10kV各自投动作;

04分28秒109毫秒,侯家塘变10kV母联110断路器合闸;10kV I段母线由2号变压器转供电。

调阅了1号变压器35kV侧后备保护录波波形见图4。图4中,从上到下分别为1号变压器35kV侧后备保护A相、B相、C相电流(I_A 、 I_B 、 I_C)和A相、B相、C相电压(U_A 、 U_B 、 U_C),及3倍零序电压($3U_0$)和3倍零序电流($3I_0$)。

由图4的故障录波波形可以看出,故障时,B相和C相电流同相且大小相等,而A相电流与B相和C相电流反相且大小与B相和C相电流之和相等。由保护动作信息和故障录波可知,差动保护的差动速断整定值19A,而差动差流电流值为19.16A,超过定值,故差动速断保护动作(2ms后比率差动保护动作),启动336和101断路器跳闸,切除故障。故障持续了约5个周波100ms。

3.2 短路故障定性分析

1号变压器35kV侧A相绕组短路,为什么会出现B相和C相电流同相且大小相等,而A相电流与B相和C相电流反相且大小与B相和C相电流之和相等的情况?下面通过定性分析,揭示这一现象。

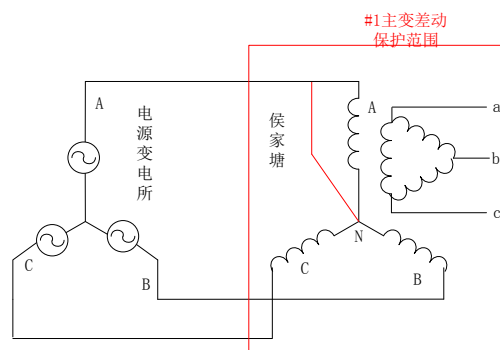


图5 1号变压器35kV侧A相短路时电路示意图

1 号变压器 35kV 侧 A 相短路时供电的电路示意图如图 5。

由于变压器 35kV 侧 A 相绕组短路（假设为金属性短路），则 B 相绕组、C 相绕组分别承受线电压 U_{BA} 和 U_{CA} ，该电压传变到变压器二次绕组对应 ab 绕组与 cb 绕组的等效电势为 $E_{ab} = \sqrt{3}E_{AB}/n$ 和 $E_{cb} = \sqrt{3}E_{CA}/n$ ， n 为变压器变比，即变压器高压侧与低压侧线电压之比。 E_{ab} 与 E_{cb} 的合成等值电势为 E_{ac} ：

$$\begin{aligned} E_{ac} &= E_{ab} - E_{cb} \\ &= \sqrt{3}E_{AB}/n - \sqrt{3}E_{CA}/n = 3\sqrt{3}E_A/n \end{aligned} \quad (1)$$

该电势加在变压器二次 ac 绕组上。变压器二次 ac 绕组与变压器一次 AN 绕组组成一个单相变压器，见图 6。

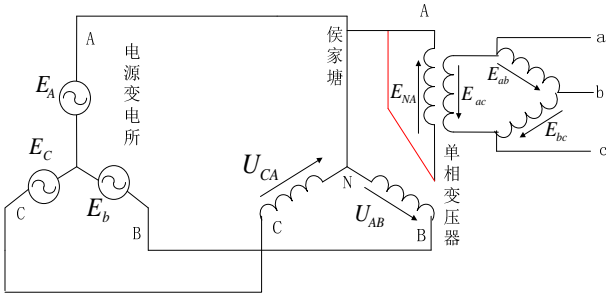


图 6 1 号变压器 35kV 侧 A 相短路时电压分布图

变压器二次 ac 绕组电压传变到 AN 绕组的等效电源电势为：

$$E_{NA} = U_{AN} = (3\sqrt{3}E_A/n) \times (n/\sqrt{3}) = 3E_A \quad (2)$$

单相变压器高压 A 相绕组短路电流为：

$$I_{NA} = 3E_A/Z \quad (3)$$

(3)式中， Z 为综合阻抗折算到单相变压器高压绕组侧的阻抗。该电流由单相变压器高压绕组传变到低压绕组侧的电流为 I_{ac} 仅是变比的变化，见(4)式：

$$I_{ac} = I_{AN} \times n/\sqrt{3} = n\sqrt{3}E_A/Z \quad (4)$$

因为 35kV 变压器二次绕组接成三角形，同时变压器低压侧没有电源，该短路电流没有流出变压器三角形二次绕组，所以 I_{ac} 在变压器三角形二次绕组形成环流，该环流电流大小相等相位一致，即有 $I_{ac} = I_{cb} = I_{ba}$ ，见图 7。由 35kV 变压器低压绕

组侧的电流 I_{cb} 、 I_{ba} 传变到高压绕组侧 I_B 、 I_C 仅是变比的变化，则有 $I_B = I_C$ 。短路电流 I_B 、 I_C 为：

$$I_B = I_C = I_{ac} \times \sqrt{3}/n = 3E_A/Z \quad (5)$$

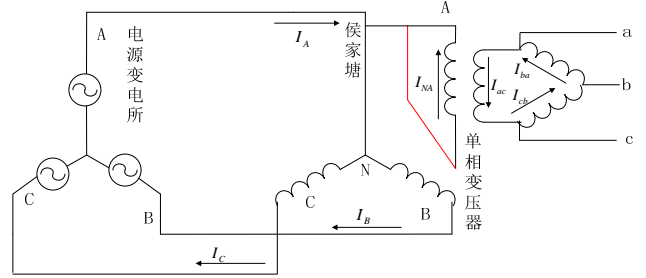


图 7 1 号变压器 35kV 侧 A 相短路时电流分布图

因为综合阻抗 Z 的角度为约 $80^\circ \sim 90^\circ$ ，故短路电流 I_B 、 I_C 滞后 U_A 约 $80^\circ \sim 90^\circ$ ；而 1 号变压器 35kV 侧 A 相引线的电流为 $I_A = -(I_B + I_C) = -2I_B$ ，即 A 相电流大小为 B、C 相电流的 2 倍，相位与 B、C 相电流反相，超前 U_A 约 $80^\circ \sim 90^\circ$ 电流分布图见图 7。

由(3)式、(5)式可知，变压器 35kV 侧 A 相绕组的电流与 B 相绕组或 C 相绕组的电流大小相等相位相同。因为从变压器绕组磁链平衡角度来看，有：

$$\begin{aligned} &(i_{NA}W_1 - i_{ac}W_2) + (i_BW_1 - i_{ba}W_2) + (i_CW_1 - i_{cb}W_2) \\ &\approx 0 \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式中， i_{NA} 、 i_B 、 i_C 分别为 I_{NA} 、 I_B 、 I_C 的瞬时值， i_{ac} 、 i_{ba} 、 i_{cb} 分别为 I_{ac} 、 I_{ba} 、 I_{cb} 的瞬时值， W_1 、 W_2 为高压一相绕组的匝数和低压一相绕组的匝数，因为 $I_{ac} = I_{cb} = I_{ba}$ ，因此根据(6)式也有 $I_{NA} = I_B = I_C$ ，即变压器 35kV 侧 A 相绕组的电流与 B 相绕组或 C 相绕组的电流大小相等相位相同。

由于变压器 35kV 侧 TA 的极性是以母线指向变压器为正方向，所以图 4 的录波图中 A 相电流、B 相电流、C 相电流与上述分析的 I_A 、 I_B 、 I_C 电流相位相反，录波图中（即实际的电流）的 B 相电流与 C 相电流超前 U_A 约 $80^\circ \sim 90^\circ$ ，而 A 相电流滞后 U_A 约 $80^\circ \sim 90^\circ$ 。

3.3 短路故障电流推导与计算

3.3.1 短路故障电流计算公式推导

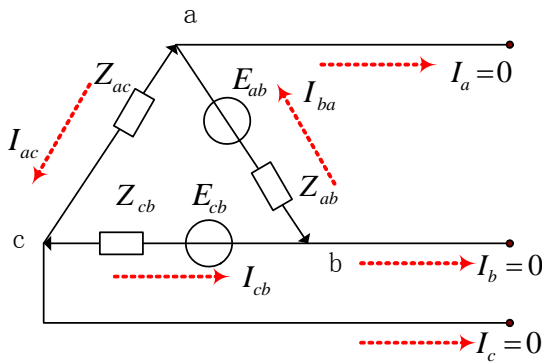


图8 短路电流计算等值电路图

图8为短路电流计算等值电路图^[5]。 Z'_S 、 Z'_B 分别为侯家塘变电所35kV侧母线的B与C相电源阻抗 Z'_S 、35kV侧的B与C相的变压器阻抗 Z'_B 折算到变压器10kV绕组侧的等值阻抗（其中变压器阻抗 Z'_B 和单相变压器 Z_{ab} 阻抗相等）；图8中ab臂电源和bc臂电源的等值阻抗 $Z_{cb} = Z_{ab} = Z'_B + Z'_S$ ，ac臂的等值阻抗 $Z_{ac} = Z'_B$ 。

由图8得到变压器低压三角侧环流电流为：

$$\begin{aligned} I_{ac} &= I_{cb} = I_{ba} \\ &= (\sqrt{3}E_{CA}/n + \sqrt{3}E_{BA}/n)/(Z_{ab} + Z_{cb} + Z_{ac}) \\ &= 3\sqrt{3}U_A/(n(2Z'_S + 3Z'_B)) \end{aligned} \quad (8)$$

该环流电流折算到变压器35kV侧的电流为：

$$\begin{aligned} I_B &= I_C = 0.5I_A \\ &= (3\sqrt{3}U_A/n(3Z'_B + 2Z'_S)) \times (n/\sqrt{3}) \\ &= 3U_A/(3Z'_B + 2Z'_S) \end{aligned} \quad (9)$$

3.3.2 短路故障电流计算

侯家塘变电所35kV母线短路容量为155MVA，10MVA变压器短路阻抗7.5%，取基准容量为100MVA，基准电压为平均电压37kV，则有35kV的基准电流 I_j 为1560A，电源内阻抗 Z'_S 的标幺值 Z_{S*} 为0.6452，35kV变压器阻抗 Z'_B 的标幺值 Z_{B*} 为0.75。所以根据(9)式计算A相短路电流的大小为（采用标幺值计算）：

$$\begin{aligned} I_A &= 3I_j/(Z_{S*} + 1.5Z_{B*}) \\ &= 3 \times 1560/(0.6452 + 1.5 \times 0.75) \\ &= 2644A \end{aligned} \quad (10)$$

由保护动作信息得到差动保护A相差动速断

的动作电流为19.16A，TA变比为600/5。1号变压器差动保护装置型号为DSA-321，变压器差动保护采用高压侧移相。由于 $I_A = -2I_B$ ，因此，TA的二次电流有 $I_{a2} = -2I_{b2}$ ，所以流入A相差动继电器回路的差电流值 I_{DA} 为 $I_{DA} = (I_{a2} - I_{b2})/\sqrt{3} = I_{a2}\sqrt{3}/2$ ，而 $I_A = I_{a2}/n$ ，所以折算到变压器35kV侧A相一次的实际短路电流为 $I_A = 2I_{DA} \times n/\sqrt{3} = 2 \times 19.16 \times 120/\sqrt{3} = 2655A$ ，该短路电流与(10)式的短路电流2644A接近，所以计算结果与根据保护动作信息得到短路电流是相符的。

3.4 变压器差动保护动作行为分析

变压器差动保护的差动速断整定值19A，而差动差流电流值为19.16A，超过了整定值，故变压器差动速断保护能够启动并动作跳闸。

变压器比率差动保护的动作为：

$$I_d = I_{set}, I_{max} \leq I_{set}/k + 1.5 \quad (11)$$

$$I_d = k(I_{max} - 1.5), I_{max} \geq I_{set}/k + 1.5 \quad (12)$$

(11)、(12)式中， I_d 为差动保护动作电流， I_{max} 为最大侧电流（即变压器各侧二次电流中最大的电流值）， I_{set} 为起始电流， k 为比率制动系数（取值为0.5）。

由(11)、(12)式，变压器比率差动保护的 I_{max} 为19.16A，起始电流 I_{set} 整定值1.43A，计算 $I_{set}/k + 1.5 = 4.36$ ，得到 I_{max} 大于4.36A，所以取(12)式进行计算，得到差动保护动作电流 I_d 为8.83A，而差动保护的差动差流电流为19.16A大于动作电流 I_d ，即变压器比率差动保护的灵敏系数为 $19.16/8.83 = 2.17$ 大于1，所以变压器比率差动保护能够启动并动作跳闸。

4 结论

根据录波图提供的数据、短路电流理论分析和反演分析计算结果可以得出下列结论：

1) 变压器35kV侧A相绕组短路，B相与C相电流大小相等相位一致，而A相电流大小等于B相与C相电流之和，即A相电流等于B相或C相电流的2倍，相位与B相或C相电流反相；

2) 1号变压器35kV侧B相或C相电流超前A相电压约80~90°；A相电流滞后A相电压约80~90°；

3) 变压器 35kV 侧最大短路电流 (即故障相) 理论计算公式为: $I_A = 3E_A / (Z_s + 1.5Z_B)$; 理论计算的短路电流与根据保护动作信息得到短路电流是相符的;

4) 变压器 35kV 侧 A 相绕组的电流与 B 相绕组的电流或 C 相绕组的电流大小相等相位相同。

5) 变压器差动保护的差动速断和比率差动保护的動作行为是正确的。

参考文献:

- [1] DL/T 584-2007, 3~110 kV 电网继电保护运行整定规程 [S].
- [2] 江苏省电力公司. 电力系统继电保护原理与实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 崔家佩等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 戴网虎, 汤大海, 曹斌, 等. 一起 35kV 系统非金属性三相短路保护动作行为分析[J]. 江苏电机工程, 2010, 30(6): 9-12.
- [5] 袁宇波, 李澄, 葛永高, 等. 复杂故障情况下的变压器差动保护动作特性分析[J]. 江苏电机工程, 2006, 26(5): 9-11.

作者简介:

严国平(1965-), 男, 江苏常州人, 高级工程师, 从事电网技术管理工作;

汤大海(1963-), 男, 江苏镇江人, 研究员级高级工程师/高级技师, 江苏省电力公司技术专家, 从事电网继电保护运行管理工作;

陈永明(1979-), 男, 江苏海安人, 高级工程师, 从事电网继电保护运行管理工作;

陈恒祥(1972-), 男, 江苏扬州人, 工程师/高级技师, 从事继电保护运行维护工作;

孙东杰(1985-), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 工程师, 从事电网继电保护运行管理工作;

马海薇(1981-), 女, 江苏镇江人, 工程师, 从事电网调度运行管理工作;

陈 燕(1981-), 女, 江苏镇江人, 工程师, 从事电网调度运行管理工作;

曹 斌(1977-), 男, 江苏海安人, 高级工程师, 从事电网继电保护运行管理工作;

刘沪平(1980-), 男, 江苏盐城人, 高级工程师, 从事变电生产检修管理工作。