

影响中压电子式互感器准确度问题的研究

万 雄, 张贵新, 王 强, 王 鹏

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 中压电子式电压互感器和电流互感器在试验和运行中暴露出了一系列的问题, 笔者主要针对电子式电流互感器的饱和特性以及电子式电压互感器的温度特性进行讨论。非线性励磁特性的电流互感器通常都是由闭合铁心制成的, 在大多数情况下, 由于在过渡状态中铁心饱和, 而使这种电流互感器变换一次电流的周期性分量产生的误差大大超过容许值。同时分析铁心带气隙的电流互感器, 总结了铁心有非磁性气隙的特点。介绍了基于电阻分压原理的电子式电压互感器的原理及结构, 分析了影响其温度特性的因素, 提出采用热敏电阻的温度补偿办法提高中压电子式电压互感器温度稳定性。

关键词: 电子式互感器; 非磁性气隙; 温度补偿; 误差

中图分类号: TM45

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0061-05

Research on Medium-voltage Electronic Transformers

WAN Xiong, ZHANG Gui-xin, WANG Qiang, WANG Peng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The electronic transformers have a series of problems in testing and operation. This paper discusses the saturation characteristics of electronic current transformer and the temperature characteristics of electronic voltage transformer. Current transformer with nonlinear excitation characteristics usually includes a closed-core. It can not work in transient process because of core saturation. This paper analyzes the features of the current transformer with non-magnetic air gap. The principle and structure of the electronic voltage transformer based on voltage divider are introduced, and the factors affecting its temperature characteristic are analyzed. Hence, a method of temperature compensation via thermistor is presented to enhance the temperature stability of the medium-voltage electronic transformers.

Key words: electronic transformer; non-magnetic air gap; temperature compensation; error

0 引言

电子式互感器是现代电力系统中高压电器设备向智能化、模块化、小型化、多功能化、少维护方向发展的关键设备之一, 适用于系统运行状态监测、诊断和保护。互感器是电力系统中重要的测量设备, 它为电力系统提供用于计量、控制和继电保护所必须的信息^[1]。多年的实践表明, 传统的电磁式互感器绝缘结构复杂, 存在磁饱及铁磁谐振现象、动态范围小、体积和重量大等固有的缺陷^[2,3]。而且, 随着数字化变电站的迅猛发展, 互感器的二次输出不再需要提供较大的功率。因此, 目前世界各国都在大力发展新型的电子式互感器, 在消除了电磁式互感器一些重大缺陷的同时, 其小功率的二次输出也适应了数字化变电站的发展需求^[4]。

互感器是保证电力系统正常、安全和可靠运行的重要设备, 它使用量多、使用面积广, 直接接在发电厂或变电站的输电线上, 或者接到变电室内, 且中压互感器可以接电能计量系统, 它的失效往往造成较大的损失。因此互感器必须具有非常高的运行可靠性^[5-10]。

中压电子式电压互感器和电流互感器在试验和运行中暴露出了一系列的问题, 笔者主要针对电子式电流互感器的饱和特性以及电子式电压互感器的温度特性进行讨论。分析的中压电子式电流互感器测量部分一般采用低功率电流互感器(LPCT)或者采用 Rogowski 线圈。目前 LPCT 作为一次部分, 其准确度以及温度性能更好。但是采用 LPCT 存在一个问题, 即电子式电流互感器保护线圈的设计^[11-14]。如果 LPCT 既作为测量部分又作为保护部分, 由于要考虑其饱和问题, 那么就要增大铁心的截面积。

收稿日期: 2008-11-01; 修回日期: 2009-02-04

作者简介: 万 雄(1985), 男, 硕士, 主要从事互感器方面研究。

当然,可以采用 Rogowski 线圈做为保护线圈,那么设计时就需要两个线圈,一个作为测量线圈,另一个作为保护线圈,这样增大了互感器的体积而且浪费浇注材料。

笔者还分析了电子式电压互感器分压比和温度变化的关系,总结了互感器在温度试验中的误差来源。通过对互感器进行温度试验,证实了分析的正确性,提出了一种采用热敏电阻进行温度补偿的方法。

1 电子式电流互感器的饱和问题

1.1 概述

非线性励磁特性的电流互感器通常都是由闭合铁心制成的,不宜在过渡状态中工作,其原理见图 1。在大多数情况下,由于在过渡状态中铁心饱和,而使这种电流互感器变换一次电流的周期性分量产生的误差大大超过容许值。在大容量电力系统中,短路电流倍数很高,即使将电流互感器的二次绕组短路,实际误差往往达到 70%或者更大。电流互感器的其它形式的误差也达到很大的数值。在这种条件下,降低电流互感器的负荷并不能给减小误差带来多大的效果^[15]。

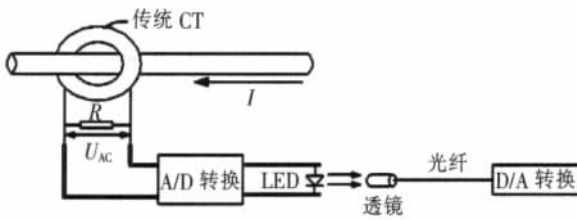


图 1 用铁心 CT 或 Rogowski 线圈作传感头的 ECT

总之,为使在上述严重条件下一二次电流的变换有足够的准确度,采用特制的在过渡状态中实际上为线性特性的电流互感器是合适的,如铁心带气隙的电流互感器。

1.2 铁心有完整气隙的电流互感器原理分析

电流互感器的铁心实际上可能有一个或几个气隙。假定铁心沿平均磁路长的横截面 S_M 不变,而且气隙断面的各点上气隙的几何长度是相同的。由于气隙边沿磁力线的凸出,铁心气隙总的计算长度 l_3 与几何长度有区别。取气隙中平均磁力线的长度作为 l_3 ,这个 l_3 是在假定不存在磁力线凸出和给定的气隙磁导率下的长度。显然,在这种条件下,每个气隙中磁通的横截面等于铁心的横截面 S_M ,而且铁心中的磁通密度 B_{CT} 与气隙中的磁通密度 B_3 也是相等的,即 $B_{CT}=B_3=B$,见图 2^[15]。图 2 中 μ_{CT} 和 μ_3 为气隙区以外铁心钢片的磁导和气隙本身的磁导。

铁心钢片总的平均磁路长标为 l_{CT} ,钢片中磁场强度为 H_{CT} ,气隙中为 H_3 ,电流互感器在任何工作状态下折算到一匝时的励磁电流

$$i_0 = H_{CT} l_{CT} + H_3 l_3$$

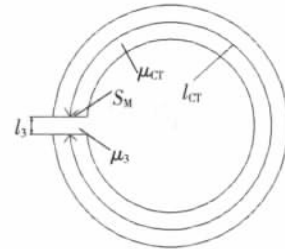


图 2 有气隙的铁心示意图

钢片中的磁场强度与磁通密度由局部磁化曲线求得的 $H_{CT}=f(B)$ 关系曲线确定。而气隙中的磁场强度按公式 $H_3=B/\mu_0$ 求得, μ_0 为空气的磁导率。

如果 S_M 和 l_3 分别以 m^2 和 m 为单位,磁通密度以 T 为单位,磁场强度以 A/m 为单位,那么磁导率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ H/m,因此

$$i_0 = i_0 / l_{CT} = f(B) + BN_p = F(B) \tag{1}$$

式(1)中, i_0 是铁心励磁电流, $f(B)$ 是闭合铁心的磁化曲线函数, B 为铁心的磁通密度, $N_p = \frac{l_3}{\mu_0 l_{CT}} = \frac{l_3 \times 10^7}{4\pi l_{CT}}$ 为铁心的去磁系数。

单位励磁电流与磁通密度的关系 $i_0=F(B)$ 是有气隙铁心的磁化曲线。这一关系可用图解法求得,这可通过曲线 $H_{CT}=f(B)$ 及直线 $H_3[l_3/(\mu_0 l_{CT})]=BN_p$ 的横坐标相加得出。也就是对于同样的 B ,新的磁化曲线对应的 H 得到提高,即提高了铁心饱和值,所以有完整气隙的铁心饱和点较完全闭合铁心的饱和点得到了很大提高。

2 铁心带气隙的电子式电流互感器

基于以上分析,笔者研制出一种铁心带气隙的电子式电流互感器,额定电流为 100 A;测量通道的传感单元采用 LPCT 原理。铁心材料为硅钢片,一二次侧匝数电压比为 5 000:1,一次电流为额定值时,二次输出 0.02 A。取样电阻温度系数小于 20×10^{-6} ,阻值为 2 Ω 。取样电阻额定功率为 0.25 W,额定电流时,其消耗的功率不到 0.01 W。

2.1 线性度试验

在实验室样机研制过程中,对带气隙铁心的电子式电流互感器做线性度试验,测试其饱和情况以及输出电压与所加额定电流的关系,数据见表 1。

表 1 带气隙铁心互感器的线性度试验

一次电流/A	二次输出/mV	一次电流/A	二次输出/mV
50	23.8	500	219.9
100	42.9	1 000	447.0
200	86.4	1 500	667.5

经过计算可以得出 2 组数据的线性相关系数为 0.999 991,总体上铁心带气隙的电流互感器在 20 倍额定电流内有很好的线性特性,可以很好地反映出线路的电流特性。

利用电流互感器的一次电流和二次输出数据,绘出电流互感器的线性度曲线,见图3。从图3中看出,铁心带气隙互感器的线性度很好,而且在20倍额定电流时不会饱和。提高铁心饱和点的特性比纯闭合铁心的互感器饱和特性要好,所以这种互感器既可以作为保护互感器也同时可以作为测量互感器。

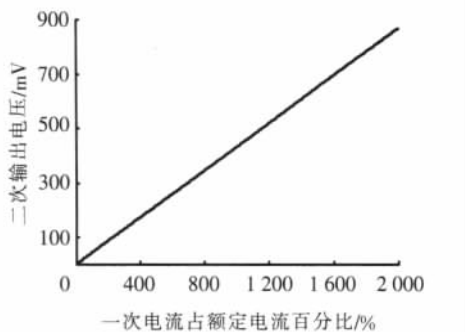


图3 带气隙铁心互感器的线性度曲线

2.2 准确度测试

在样机研制过程中,对铁心带气隙的电子式电流互感器做了准确度试验。测量得到的数据见表2。

表2 准确度试验中的比差和相位差

误差	额定电流百分数/%					
	5	20	80	100	120	2000
比差/%	-0.12	-0.02	-0.01	0.01	0.01	1.09
相位差/(°)	7.20	1.90	0.10	-0.20	0.10	-

根据表2得到的比差、角差数据可以做出此种材料的铁心带气隙电子式电流互感器的准确度曲线,见图4、5。图4、5中,虚线是IEC规定0.2级标准的误差范围^[10],这个试验说明作为测量互感器,铁心带气隙的电子式电流互感器可以达到很高的准确度;而作为保护用互感器,铁心带气隙的电子式电流互感器也能够达到IEC标准规定的5P级。带气隙铁心的电子式电流互感器可以很好地代替原闭合铁心的电子式电流互感器,而且具有很高的准确度。

图4、5很好地反映出20倍额定电流内,铁心有完整开口气隙的电子式电流互感器能够满足IEC标准中电子式电流互感器0.2级误差的要求。而且做为保护互感器使用时,其准确度比Rogowski线圈测量的准确度要高,比较真实地反映线路故障或者

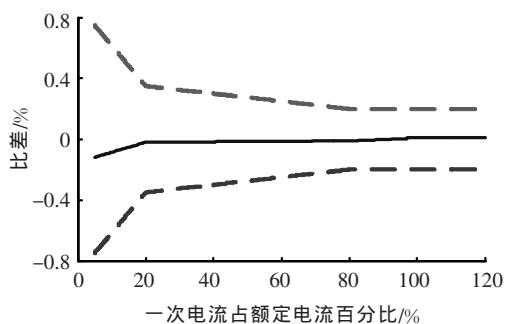


图4 带气隙铁心互感器的比差曲线

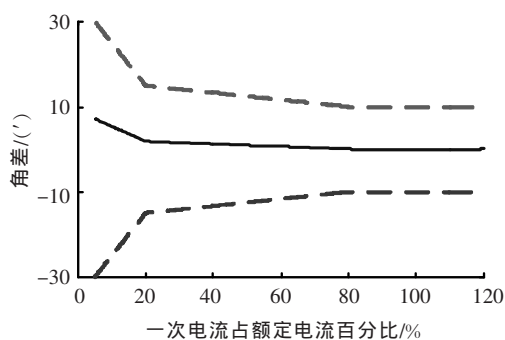


图5 带气隙铁心互感器的角差曲线

短路时电流的变化情况。

2.3 温度循环试验测试

对于上面设计的铁心带气隙电子式电流互感器,温度特性很重要,因为以往不采用带气隙的铁心主要是因为温度条件不好的情况下,电子式电流互感器的准确度会出现问题。取样电阻的温度特性对电子式互感器的准确度有很大的影响,要选择低温度系数的取样电阻^[14]。

在样机研制过程中,对铁心带气隙的电子式电流互感器做了温度循环试验。由于电子式互感器的铁心体积很小,所以基本上在高温(60℃)或者低温(-30℃)上保持3h就可以稳定下来。温度循环试验中的比差和相位差见表3。

表3 温度循环试验中的比差和相位差

温度 时间	常温	60℃	-30℃	常温	60℃	常温	-30℃
	180'		180'		180'		180'
比差/%	0.01	-0.02	0.022	0.01	-0.02	0.01	0.009
相位差/(°)	2.7	9.30	-9.200	1.20	8.00	1.50	-9.500

根据表3中的电子式电流互感器的比差和相位差的数据做出比差、相位差随温度变化曲线,见图6、7,图6、7中的虚线是IEC标准规定的0.2级电子式电流互感器的误差边界,而两条曲线分别代表的是重复两次温度循环试验得到的结果。可以看出,对于IEC标准规定的0.2级的测量线圈,铁心带完整气隙的电子式电流互感器基本上满足要求。相位差在-25~40℃内能够很好地满足比差和相位差的要求。

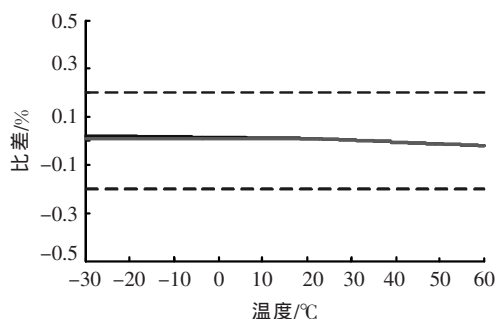


图6 比差随温度变化曲线

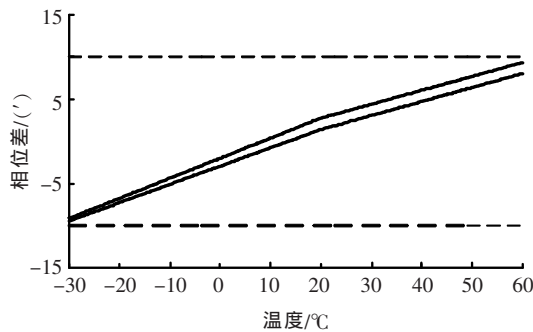


图7 相位差随温度变化曲线

3 电子式电压互感器的温度补偿

3.1 概述

基于电阻分压原理的电子式电压互感器原理框图见图8^[16]。

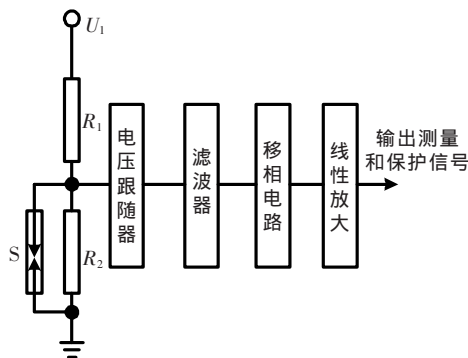


图8 基于电阻分压原理的电子式电压互感器原理框图

根据 IEC 60044-7 电子式电压互感器标准^[17], 电子式电压互感器的温度试验要求的温度范围为 -25~40 °C, 在该范围内, 电子式电压互感器的误差应符合相应准确度等级的要求。对于基于电阻分压原理的电子式电压互感器, 影响温度特性的因素主要有两个: 一个是电阻分压器本身的温度性能, 另一个是绝缘材料的温度性能。对于电阻而言, 其阻值一般都会随温度变化而变化, 要保证电阻分压器分压比的温度稳定性, 除了尽量减小电阻的温度系数以外, 还应使高低压臂电阻的温度系数尽量一致^[16]。

3.2 电子式电压温度补偿的原理

电子式电压互感器浇注完成后, 其结构是不变的, 浇注材料、结构等因素就可以认为是互感器的系统误差。根据互感器的比差随温度变化的情况, 可以考虑采用线性补偿的措施。

把浇注材料随温度变化对电子式互感器比差产生的影响设为 δ_1 , 浇注结构随温度变化对电子式互感器比差产生的影响设为 δ_2 , 互感器随温度变化对电子式互感器比差产生的影响设为 $\delta_3 \dots$, 所有这些因素随温度变化对互感器比差产生的总影响设为 δ 。其中: $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots$ 。

设互感器的比差为 λ , 温度为 t 。对于电子式电压互感器, 得到的拟合曲线为

$$\lambda = \alpha t + \beta$$

补偿量设为 γ , 补偿主要是针对互感器的比差 λ 的线性部分, 非线性部分通过模拟电路调整, 这样可以达到温度补偿的目的。电压互感器的比差理论上通过线性补偿可以限制在 IEC 标准规定 0.2 级误差范围内。

实现的方法是通过热敏电阻补偿分压器电阻, 即选择与电阻分压器温度系数相反的热敏电阻来减小互感器整体随温度变化而产生的误差。

3.3 补偿后电子式电压互感器的温度特性

对 3 支电子式电压互感器进行温度补偿, 并且进行温度循环试验。得到的试验数据见表 4, 各数据均是 3 次测量结果的平均值。

表 4 温度循环试验中的比差

编号	温度 时间	常温 4 h	40 °C 4 h	-25 °C 4 h	常温
1 号	比差/%	-0.01	0.03	-0.02	-0.02
2 号	比差/%	-0.01	-0.06	-0.05	-0.01
3 号	比差/%	-0.01	0.01	0.08	0.04

针对表 4 的数据, 分别作出温度变化的曲线, 见图 9~11。其中虚线是 IEC 中规定的电子式电压互感器 0.2 级标准要求的误差范围。

从图 9~11 可以看出, 电压互感器的比差在 -25~40 °C 的温度范围内变化不超过 $\pm 0.2\%$, 而且留有很大裕度。从曲线变化趋势上看, 比差在更大的温度变化范围内也可以满足 0.2 级标准要求, 即温度补偿能够满足电子式电压互感器的温度要求。

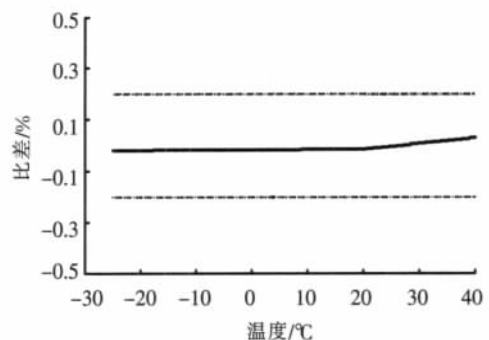


图9 1号互感器温度循环试验

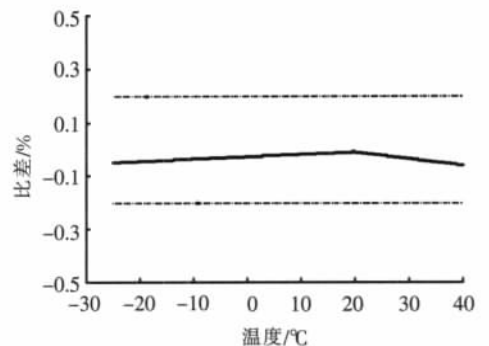


图10 2号互感器温度循环试验

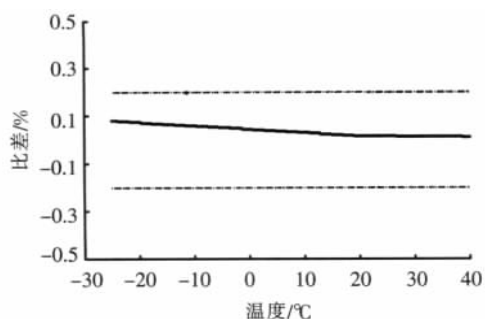


图 11 3号互感器温度循环试验

4 结语

主要针对电子式电流互感器的饱和特性以及电子式电压互感器的温度特性进行讨论。对于电子式电流互感器的铁心饱和问题,分析了采用铁心有非磁性气隙的方法,在突然短路等大电流情况下不存在饱和,所以可以既作为测量线圈又作为保护线圈,节约了互感器的空间以及成本。对铁心有非磁性气隙的电子式电流互感器进行了多次准确度和温度循环试验,结果表明,只采用铁心有非磁性气隙的电子式电流互感器准确度能够达到 IEC 0.2 级标准要求。而且温度变化时,电子式电流互感器的系统比差变化很小。

还讨论了影响电子式电压互感器温度特性的因素,提出了采用温度补偿的办法提高中压电子式电压互感器温度稳定性的办法。对温度补偿后的多个 10 kV 电子式电压互感器进行了温度试验,结果表明,温度补偿能够减小互感器随温度变化而产生的误差。适当进行温度补偿,可以抵消温度变化对电阻分压原理的电子式电压互感器导致的误差。

参考文献:

[1] 李红斌,刘延冰,吴伯华. 电子式互感器的使用现状及应用前景[J]. 电力设备, 2007, 8(1): 103-104.

- [2] 王廷云,罗承沐,田玉鑫. 电力系统中光电电流互感器研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 38-41.
- [3] 陈海清,郭守珠. 高电压领域中的光电式电流互感器[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 70-72,7.
- [4] 罗承沐,张贵新,王 鹏. 电子式互感器及其技术发展现状[J]. 电力设备, 2007, 8(1): 20-24
- [5] ROGERS A. Optical Measurement of Current and Voltage on Power Systems[J]. Optics and Laser Technology, 1977, 9(6): 273-283.
- [6] WEIKELS J, ZELIHER S, YAKYSHYN C P. An Electro-optical Voltage Transducer [C]// GIGRE, Paris, 1996: 27-32.
- [7] 张沛云. 电力系统中光电电流互感器分析[J]. 山东电力技术, 2001, 119(3): 24-26.
- [8] 梁曦东,陈昌渔,周远翔. 高电压工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [9] 彭 丽. 10 kV/35 kV 电子式电压/电流互感器研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2004.
- [10] IEC 60 044 -8. Instrument transformers-Part 8: Electronic Current Transformers[S]. 1999.
- [11] 杨 楠. 10 kV 电流/电压组合式传感器的研制 [D]. 辽宁: 大连理工大学, 2005.
- [12] 张贵新,赵清娇,罗承沐. 电子式互感器的现状与发展前景[J]. 电力设备, 2006, 7(4): 108-109
- [13] 张贵新,王 鹏,罗承沐. 加快有源电子式互感器推广应用需要解决的问题[J]. 电力设备, 2007, 8(1): 105-106.
- [14] 王 鹏,张贵新,朱小梅,等. 电子式电流互感器温度特性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 60-64
- [15] B B 阿法纳西耶夫. 电流互感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [16] 彭 丽,徐 雁,朱明钧. 用于 10 kV 线路的电阻分压式电压互感器[J]. 变压器, 2003(11): 17-21.
- [17] IEC 60044 -7. Instrument Transformers-part 7: Electronic Voltage Transformers[S]. 1999.

中国电器工业协会标准化工作委员会一届五次 暨 2009 年电器工业标准化工作会议在西安召开

简 讯

由中国电器工业协会主办,西安高压电器研究院承办的中国电器工业协会标准化工作委员会一届五次暨 2009 年电器工业标准化工作会议于 5 月 13 日~16 日在西安召开。中国机械工业联合会特别顾问、中国电器工业协会终身荣誉会长陆燕荪,国家标准化管理委员会副主任石保权,国家标准化管理委员会工业二部部长王莉、国际部处长郭晨光,国家工业和信息化部装备司机械处处长韩行、科技司处长张力超,中国机械工业联合会重大办处长呼淑清、国家能源局科技装备司科技处处长修炳林,国务院三峡办司长李秦,中国电器工业协会会长邢玉久、杨启明、方晓燕,西电集团团市委常委、西电电气副总经理裴振江,西高院总经理郑军,副总经理李鹏、苟锐锋,以及来自全国电工行业的 130 多名代表参加了会议。会议期间还举办了专题技术报告会,来自西高院、哈电集团、许继集团等单位的 5 位专家作了交流发言。