



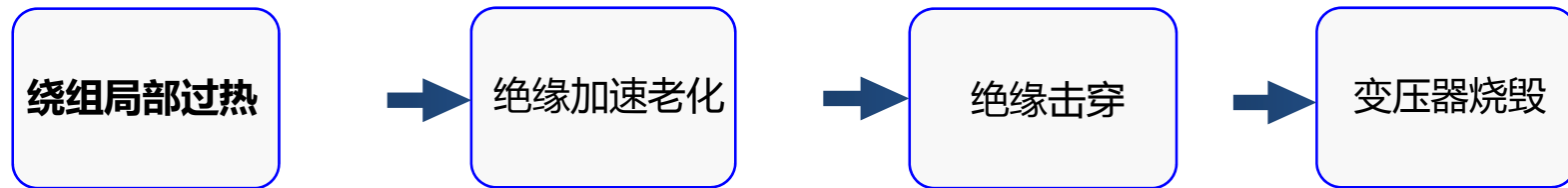
变压器绕组荧光光纤温控技术

汇报人：张文松 研究员/教授/国家“万人计划”

**西安和其光电科技股份有限公司
中国科学院西安光学精密机械研究所**

一、技术背景

准确实时的测量变压器绕组温度意义重大

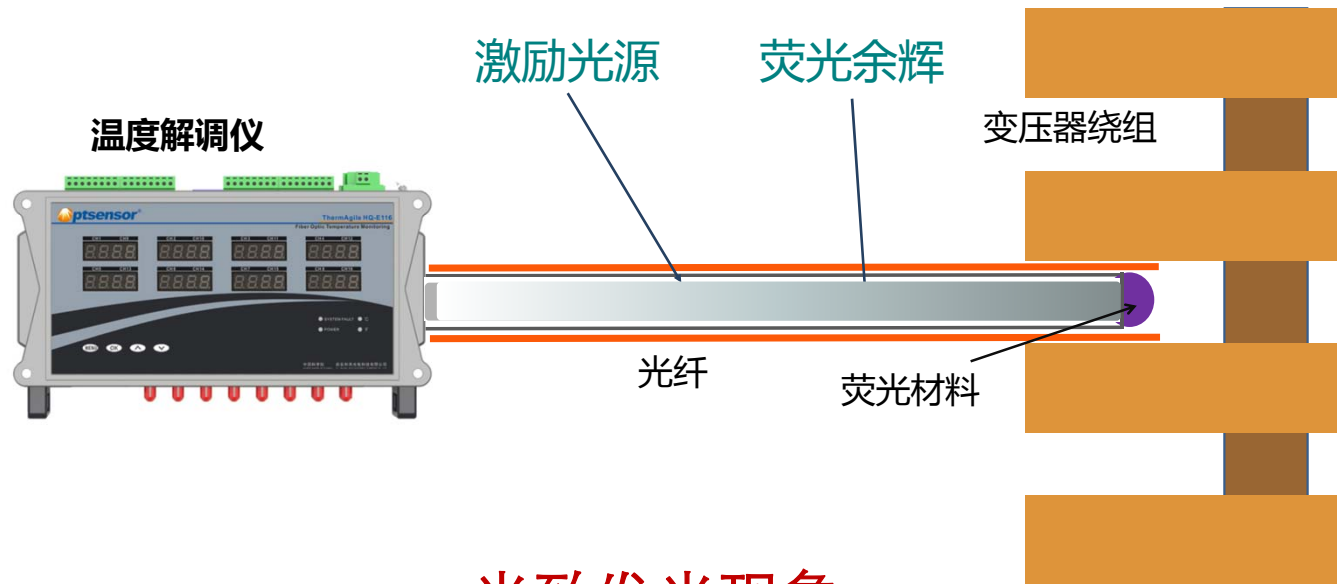


经济损失巨大！

社会影响恶劣！

一、技术背景

荧光光纤的测温原理



光致发光现象

一、技术背景

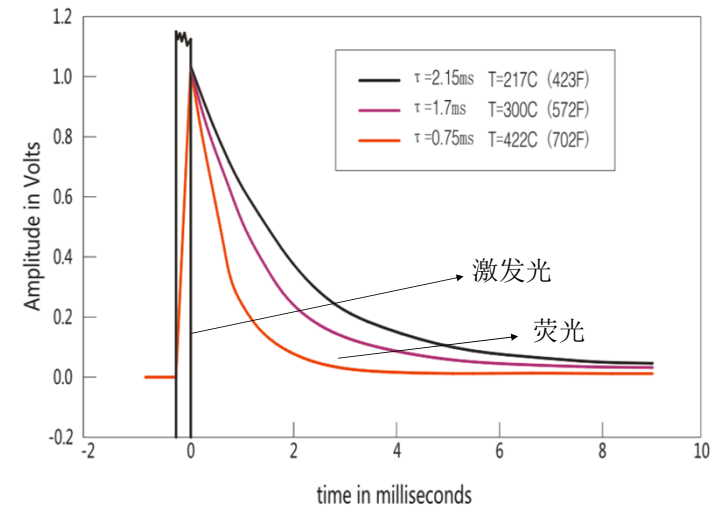
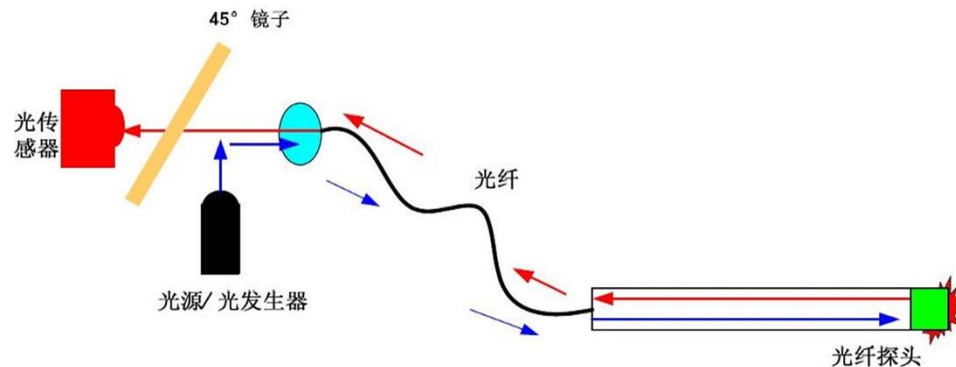
荧光光纤测温原理：

物体受光照射吸收光子跃迁，从高能级返回低能级发出荧光；激励停止，荧光按指数方式衰减，余辉时间与温度相关，测量余辉时间可得温度信息。

基于附着在光纤尾端的一种温度敏感荧光材料；单根光纤实现激发和荧光信号的传输；

$$\tau_F(T) = \frac{1 + \exp[\Delta E / (kT)]}{R_g + R_f \exp[\Delta E / (kT)]}$$

式中, R_g 、 R_f 、 k 、 ΔE 均为常数； T 为绝对温度。



基于时间测量方案+闭环自动增益控制功能确保不受下列因素影响：

光缆耦合损耗；
光缆弯曲；
灰尘和刮痕；
荧光强度变化；

一、技术背景

荧光光纤测温成为变压器温度监测的主流技术

主流技术

荧光光纤测温技术

直接接触热点
测温准确
响应速度快
稳定性高
无需校准

半导体光纤测温技术

易产生温度漂移
与光纤长度、安装
弯曲有关
测量误差大
需要校准

绕组温度计

温度模拟精度差
反应速度慢

一、技术背景

国内外技术及应用现状

- ◆ IEC标准要求变压器绕组应用光纤测温，国外印度、印尼、澳大利亚、欧美等很多国家是标配；
- ◆ 出口的大型变压器大部分要求光纤测温；
- ◆ 我国火力电气二次设计变压器绕组光纤测温成为标准设计；
- ◆ 我国在建高铁牵引变绝大部分应用了绕组光纤测温；
- ◆ 南方电网已经开始应用。

IEC 60076-2 导则规定探头安装数量如下：

Table E.1 – Minimum recommended number of sensors for three-phase transformers

Rated power MVA	Cooling system	Number and phases of installation				
		Total	On central phase		On each lateral phase	
			HV winding	LV winding	HV winding	LV winding
≥ 100	All system	8	2	2	1	1
From ≥ 20 to < 100	ON.. –	6	1	1	1	1
	OF..					
	OD..	8	2	2	1	1



竞争格局

- ◆ 国际：三家公司LumaSense、Qualitrol、Fiso，品牌积累时间长，但售价高、技术服务能力低。
- ◆ 国内：中科院西安光机所、和其光电等供应商，优势在于产品可靠性高，成本可控、综合性价比高、技术支持服务能力强。

一、技术背景

国内外技术及应用现状

- ◆ 和其光电与武汉南瑞、西安光机所、江苏省电力公司共同参与的国家电网科技项目《基于荧光光纤传感的变压器绕组测温技术研究》，与河北电科院、上海交通大学、西安光机所等单位联合承担的《基于荧光光纤传感的变压器绕组测温技术与应用》项目均已顺利验收。
- ◆ 其中《基于荧光光纤传感的变压器绕组测温技术与应用》项目获得了2018年国家电网公司科学技术进步奖三等奖。



二、主要技术创新

创新点 1

攻克了荧光传感材料研制和光纤温度解调等多项关键技术，研制了具有完全自主知识产权的荧光光纤测温传感器及整套装置，测温准确度和分辨率等关键技术指标方面达到国际同类水平。

「技术成果」

荧光材料研制

温度解调技术

装置国产化



二、主要技术创新

1

提出了以氟锆酸镁为基质的感温材料配置方法和工艺，荧光强度高和余辉持续时间长，克服了传统材料性能不佳导致的测试误差。

关键技术

高温固相法

- 提高材料稳定性

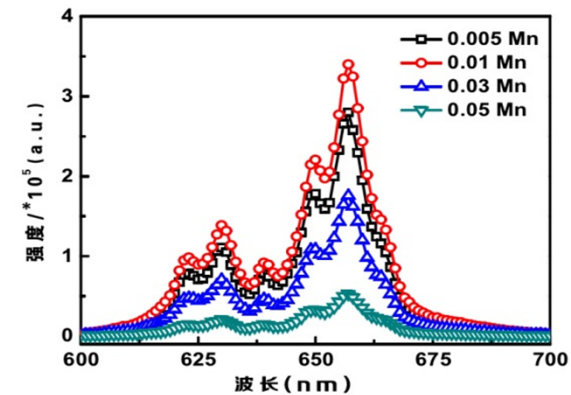
特殊合成工艺

- 控制晶体结构和大小

各种稀土的掺杂比例

- 有效避免浓度淬灭现象

荧光寿命达ms级
荧光强度提高50%



稀土比例与荧光强度的关系

二、主要技术创新

2

攻克了通过荧光余辉时间解调绕组温度的关键技术，研制了精度达到 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的光纤温度解调仪，实现了温度的准确测量。

关键技术

基于积分比值的温度
解调算法

有效消除随机噪声和直流分量的影响，测量时间约为荧光寿命的2 ~ 3倍，加快了测量速度和实时性

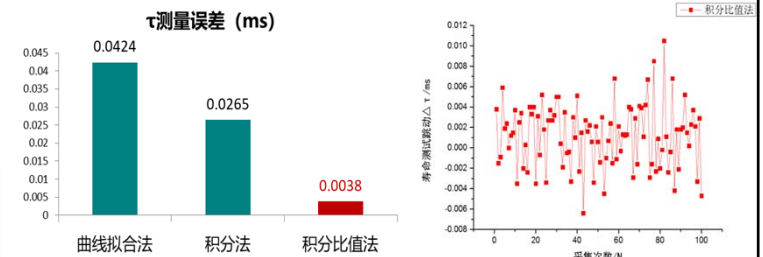
基于LED驱动的电
流增益自动控制技术

通过脉宽调制克服了输入信号变化的影响，解决了光能量耦合效率不一致引起信号强度变化的难题

优化的硬件电路设计

降低了电磁干扰的影响

有效提高了温度解调的准确性



二、主要技术创新

创新点 2

揭示了各种光纤保护材料在变压器油中的热老化特性，制定了保护材料的最佳选择方案，有效延长了光纤绝缘寿命。提出了便捷的光纤老化状态无损评估方法，验证了装置在变压器内部长期运行的可靠性。

「技术成果」

光纤热老化特性

保护材料选择方案

光纤绝缘评估方法



二、主要技术创新

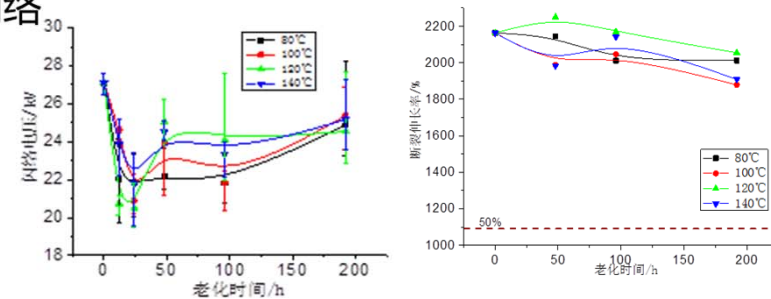
1

通过加速老化试验研究了常见光纤保护材料的热老化特性，红外光谱、机械拉伸和闪络电压等数据表明，聚四氟乙烯具有最好的抗热老化特性和油相容性，寿命可以达到40年以上。



- 低烟无卤交联聚烯烃
- 耐油交联聚烯烃
- 聚氨酯
- 耐油聚氯乙烯
- 耐油乙丙橡胶
- 聚四氟乙烯

- 红外傅里叶光谱
- 机械拉伸
- 沿面闪络



光纤保护材料加速老化后机械拉伸和闪络电压试验结果

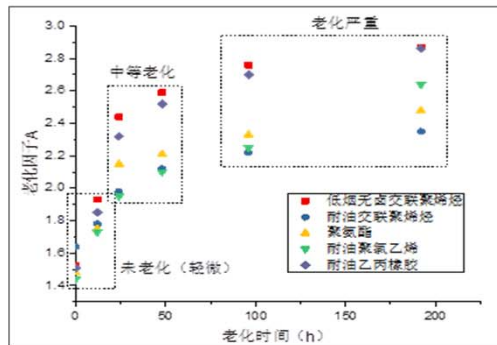
二、主要技术创新

2

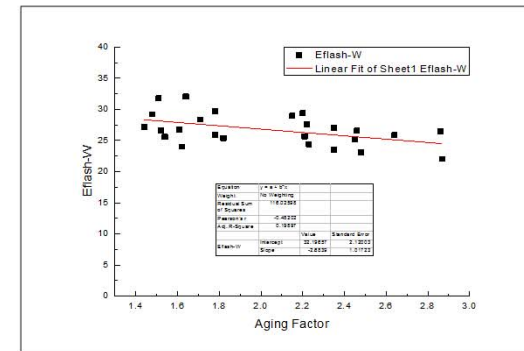
提出了基于等温松弛电流的光纤的老化状态评估方法、判据及其检测装置，实现了对光纤运行状态的及时掌控。

通过实验数据统计分析，建立了闪络电压与老化因子之间的线性关系式，提出了光纤老化状态和剩余寿命的评估判据。

$$U_{flash-W} = 32.20 - 2.68A$$



光纤老化状态的判据



沿面闪络电压与老化因子A之间的关系

二、主要技术创新

创新点 3

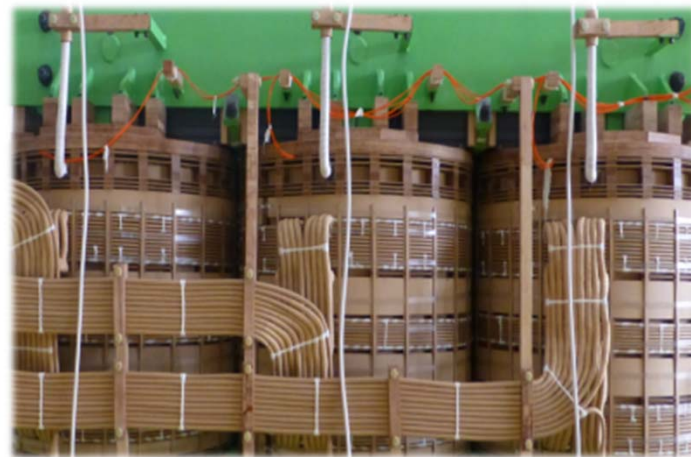
攻克了传感器及光纤在变压器内部安装时测温点选择、固定方式和光纤布置等难题，提出了可更换的传感器安装方法，制定了工厂安装工艺及质量控制标准，提高了装置的整体安装质量。

「技术成果」

测温点选择

传感器固定方式

光纤布置方式



二、主要技术创新

1

计算获得了变压器绕组的热点位置，提出了传感器的布置方式和原则，解决了监测数据不能准确反映最热点温度的难题。

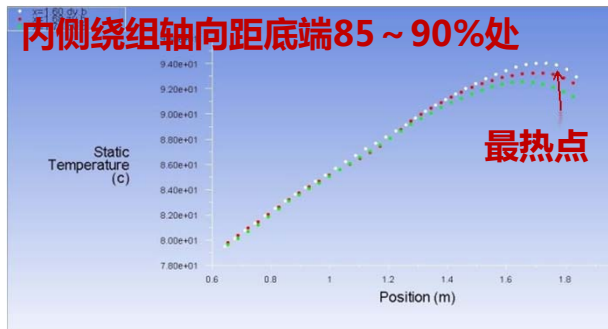
内部温度场准确仿真计算

确定内部温度最热点

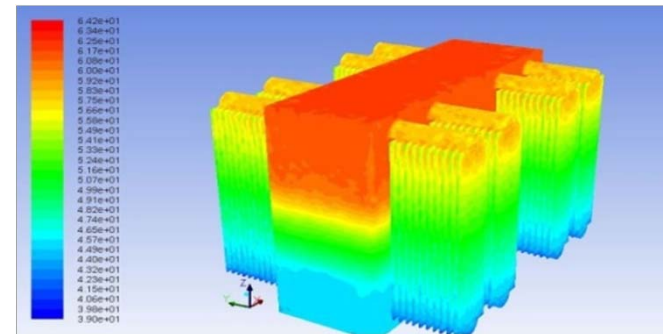
通过6台变压器温升试验验证

提出传感器安装位置

确保传感器安装在绕组最热点位置



温度沿绕组轴向的分布情况



变压器内部整体温度场分布

二、主要技术创新

2

提出了通过预置绝缘导管安装测温传感器的方法，实现了在传感器在绕组不拔包解体状态下的便捷更换。

技术优点

便捷更换

降低光纤损坏风险



带绝缘导管的辐向垫块

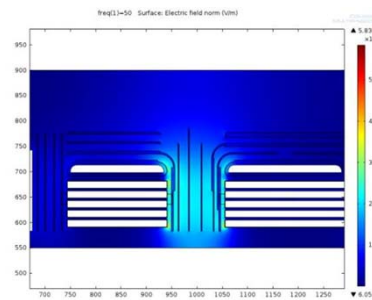


辐向垫块在绕组上的安装

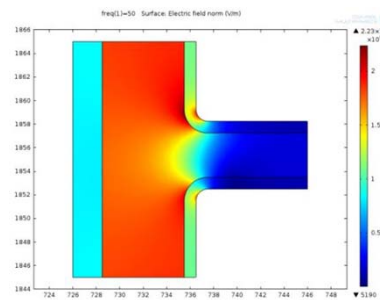
二、主要技术创新

3

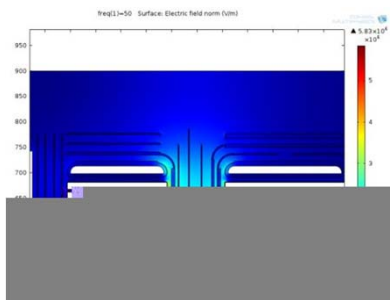
基于对内部电场仿真和绝缘结构的综合分析，确定了各种型号变压器的光纤合理引出方法和布置路线，对变压器内部电场没有形成明显影响。



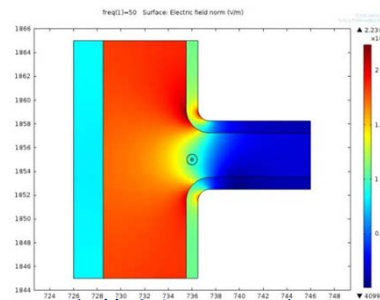
安装光纤前（整体）



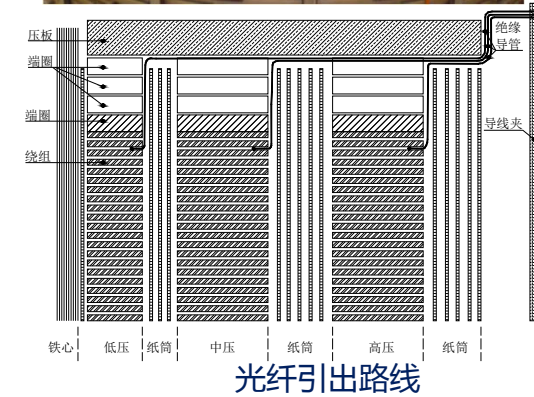
安装光纤前（局部）



安装光纤后（整体）



安装光纤后（局部）



二、主要技术创新

4

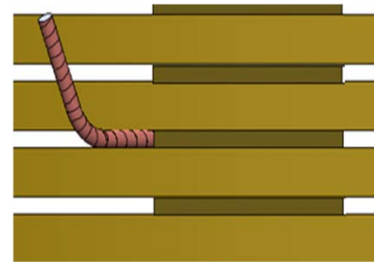
提出了适用于绕组、夹件等不同位置以及各种绕组型式的传感器固定方法及标准绝缘件，形成了《变压器绕组荧光测温装置工厂安装导则》，保证了安装质量。

传感器的固定方式
及其标准件

光纤引出及布置路
线

关键环节操作规范
和过程质量控制标
准

荧光光纤测温
装置工厂标准
化安装导则



三、同类技术比较

项目研制的荧光测温装置测温范围、精度、分辨率和运行寿命等关键技术性能指标均达到或超过国外主流产品。

国内与国外主流产品的技术指标对比

厂家 技术指标	美国LumaSense	加拿大FISO	国内
测温范围	-30℃ ~ + 200℃	-40℃ ~ + 225℃	-45℃ ~ + 250℃
测量精度	±1.0℃	±1.0℃	±1.0℃
分辨率	0.1℃	0.1℃	0.1℃
采样时间	1s	1s	1s
运行寿命	30年	10年	40年
安装工艺	需拔包更换	需拔包更换	无需拔包可便捷更换

四、客观评价

1

系列荧光测温产品通过了电力工业电气设备质量检验检测中心等多家权威机构的检测。

1 电力工业电气设备质量检验检测中心

- ◆电磁兼容
- ◆绝缘强度
- ◆温度交变
- ◆振动
- 等23项



2 陕西计量院 苏州美标公司

- ◆测温范围
- ◆测温精度
- ◆温度分辨率
- ◆采样时间



3 苏州美标公司

- ◆与25号变压器油相容性



四、客观评价

2

我国变压器绕组荧光光纤温控技术水平已经是世界第一

- ◆ 2019年9月5日，和其光电的变压器绕组荧光光纤温度传感器最关键的耐压、局放测试在本行业内国际公认的最权威的检测机构魏德曼实验室再次如期完成。其中油中耐压最小耐压达到8.8Kv/mm（平均值11.4Kv/mm），油中局放测试（ $\leq 10\text{pc}$ ）最小值为7Kv/mm（平均值10.4Kv/mm）。测试结果超出国外同类产品相关性能指标（平均耐压4Kv/mm、局放5Kv/mm）。
- ◆ 2019年9月17日，和其光电最大客户特变电工反馈，和其光电的变压器绕组荧光光纤温控系统，连续20多批次高温烘烤检测没有问题，产品可靠度达到100%，明显优于国外厂家。

五、推广应用及效益

1 推广应用情况



测温产品推广应用情况

在国内外发电、供电和铁路等用户**1000**余台变压器上安装应用，测温准确且运行状况良好！

安装工艺推广应用情况

天威保变应用本项目提出的安装工艺完成了**100**余套荧光光纤测温装置的工厂安装，全部随变压器通过了出厂试验，实现安装成功率**100%**。



五、推广应用及效益

2 推广应用情况

应用基础

已应用于南方电网、特变电工、中国西电、天威保变、山东电力、许继电气、云南变压器厂、卧龙电气、山东达驰、沈变、衡变、泰开、正泰、南京立业、GE、ABB、西门子、施耐德等数十家单位。在国际上，2012年西变出口越南的500kV变压器已经应用，2016年衡变出口埃及的变压器已经应用，2018年西变出口印度的变压器已经应用。



五、推广应用及效益

3 推广应用情况

序号	项目名称	温控系统（数量）	测温点	变压器厂
1	国家电网科技项目	2	24	常州东芝
2	国家电网科技项目	2	12	保定天威
3	国家电网四川电力公司项目	2	4	山东泰开
4	南方电网广东清远110kV变电站改造项目	1	8	山东电力
5	南方电网云南西双版纳农网改造项目	2	12	云南变压器
6	华能涇池（2×350MW）热电联产工程	2	24	西电西变
7	陕投麟游2×300mw项目	5	60	西电西变
8	华能宁夏大坝2×660MW机组工程	2	12	西电西变
9	陕西地方电力华洲南110KV变电站	2	18	西电西变
10	陕西地电宝鸡眉县潼关寨110KV项目	2	18	西电西变
...	...	...	...	...
58	永广铁路	2	16	云南变压器
59	长白快速铁路	14	112	中铁保变
60	京沈铁路	10	80	中铁保变
61	包环铁路	2	16	中铁保变
62	京原电气化改造铁路太原局管段	4	24	山东达驰
63	吴中城际铁路	2	16	银川卧龙
64	银西铁路吴中到中卫段	6	48	银川卧龙
65	平齐电气化改造铁路沈局管段	10	80	中铁保变
66	京沈铁路	10	60	常州太平洋
...	...	...	...	...

五、推广应用及效益

4

推广应用情况

山东电力
1000KV油浸式电抗器应用



国家电网
陕西永乐110KV变电站



陕西地方电力
镇安水源/眉县潼关寨/富水110KV变电站



五、推广应用及效益

5

推广应用情况

西安和其光电变压器绕组荧光光纤温控产品在国网的试点应用情况：

国网试点应用情况

- 1、国网陕西永乐110KV变电站已运行1年。
- 2、国网四川达州海田110KV变电站已运行两个月。
- 3、国家电网山东荷泽南郊110KV变电站投运两个月。
- 4、国网太原北500KV变电站项目，已经供货。
- 5、国网湖北孝感金马智慧变电站项目，已经供货。
- 6、国网山东泰安110KV变电站已经供货。
- 7、国网南阳试点工程已经供货。
- 8、国网第三批招标，有7个变电站要求A类物资设备采购，要求型式试验采用光纤测温，已经报价。
- 9、中国电科院武汉试验基地，10KV变压器两套已经运行。
- 10、国网浙江10KV变压器光纤测温两套已经挂网运行。
- 11、开关柜测温，在河南信阳、南阳、周口已经挂网运行120套产品。河南还有9个市局在申报开关柜测温试点工程。
- 12、和其光电开关柜测温产品在冀北电力公司沙河实验站通过开关柜测试。
- 13、环网柜电缆头光纤测温产品，得到中国电科院的认可，并且在浙江嘉善、山东济南、山西太原共有160套产品在运行。

五、推广应用及效益

6

推广应用情况

重要进展：2019年4月，和其光电“HQ-E116变压器绕组荧光光纤温控系统”顺利通过国家电网新技术评估

218	HEMS-DRMS柔性负荷控制系统	杭州赫智电子科技有限公司
219	HQ-E116变压器绕组荧光光纤温控系统	西安和其光电科技股份有限公司
220	电力系统防雷设备全生命周期管理与智能化监控技术与研究	深圳康普盾科技股份有限公司

近日，国家电网公司公布了220项新技术通过评估，名单如下：

为全面贯彻落实国家创新驱动发展战略，推动新技术推广应用工作不断深入，国家电网有限公司面向全社会开展了新技术征集及评估工作。在各设备制造企业、各省（市）电力公司等单位的高度重视和积极配合下，2017年7月至2018年6月，新技术征集系统共收到1735项新技术（新产品）成果申报。国家电网有限公司组织专家进行了公正、客观、全面地评估，技术评估综合考虑技术原理科学性、性能指标先进性、功能指标有效性等多种因素，共计220项新技术通过评估。现公布如下：

通过评估的新技术汇总表

序号	新技术名称	申请单位
1	地县调控一体化实时信息分层共享技术	国网浙江电力丽水供电公司
2	交流梯形悬式复合绝缘子（聚丙烯基） （JXBW-10/100(70)、JXBW-35(70)、 JXBW-66/100(70)、和JXBW-110/100 (70)）	江苏金三力电力器材实业有限公司
3	球墨铸铁杆塔	山东电工电气
4	便携式免挖盖电缆井探测装置	国网福建电力泉州供电公司
5	会议电视系统质量评估和智能化运维技术	国网江苏电力
6	基于外壳振动检测的GIS机械类缺陷诊断技术	国网江苏电力
7	基于等离子体射流的自然积污硅橡胶材料表面憎水性快速提升技术	国网江苏电力
8	35kV架空线路绝缘护套	国网上海电力
9	126kV电机驱动六氟化硫断路器	平高集团

五、推广应用及效益

7 间接经济效益及社会效益

提供了变压器绕组热点温度的有效监测技术

延长变压器使用寿命

确保内部绝缘不因局部过热而破坏，延长了变压器使用寿命

打破国外技术垄断

打破了国外产品的长期技术和市场垄断
促使其价格降低40%以上

推动行业技术进步

推动电力行业及其相关的仪器仪表产业技术进步意义重大

六、领导关怀-总书记关注

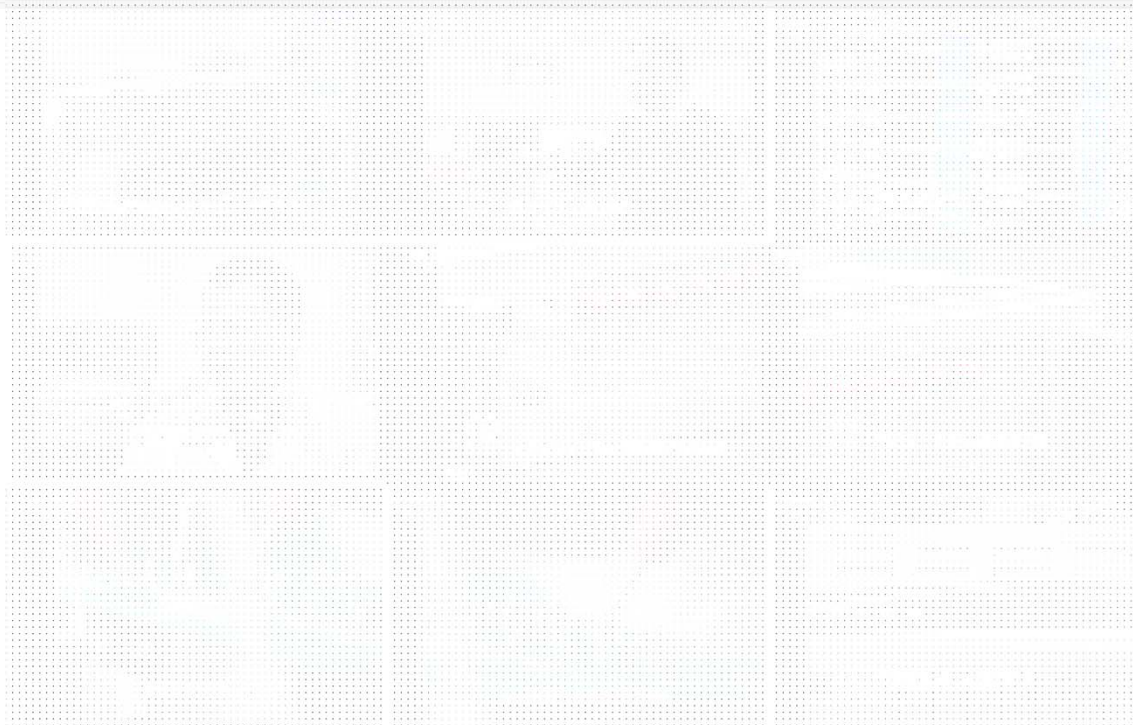
习总书记视察并关注变压器绕组荧光光纤温控技术及产品



2015年2月15日，习近平总书记在中科院西安光机所视察了和其光电的变压器绕组荧光光纤温控仪等科技成果及产品展示，期间和其光电总经理张文松向习总书记详细汇报这一科技成果的应用情况。

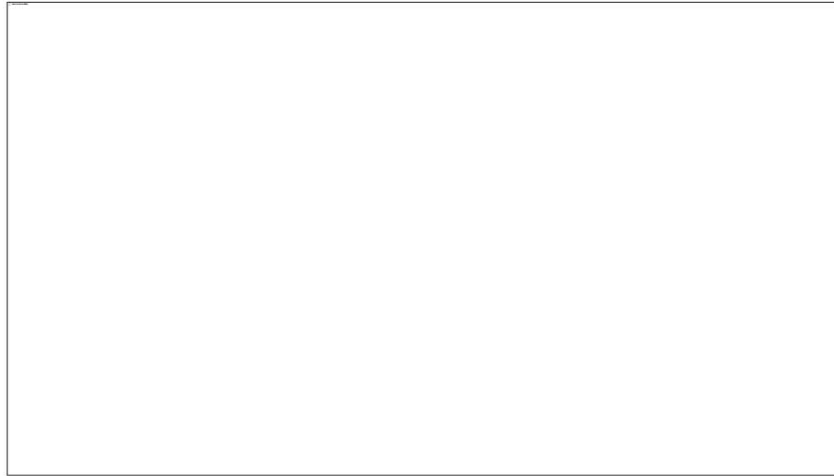
七、媒体报道-焦点访谈

2017年11月16日，焦点访谈：报道了和其光电张文松创业团队开发的变压器绕组荧光光纤温控系统这项具有突破性的创新成果。和其光电总经理张文松接受央视采访，介绍变压器绕组荧光光纤温控系统产品及应用。



七、媒体报道-人民日报

2019年9月11日，人民日报、人民视频采访和其光电总经理张文松，专题报道西安硬科技企业代表和其光电等企业，介绍了变压器绕组荧光光纤温控技术等国际上领先的系列核心技术。



八、知识产权及产业化积累

40余项专利，200多项关键材料配方技术，
50余项核心工艺技术，20余项核心算法技术。

专利

序号	专利号	专利名称	专利类别
1	ZL201010176299.8	荧光光纤温度传感器光纤探头及制备方法	发明专利
2	ZL200710018192.9	塑料光纤旋转连接器	发明专利
3	ZL200810150806.3	高功率光纤准直器及其制造方法	发明专利
4	201410127589.1	一种光纤测量电缆接头温度的方法	发明专利
...	...	...	...
27	ZL201020193905.2	荧光光纤温度传感器光纤探头	实用新型
28	ZL200810150691.8	高功率光纤隔离器	实用新型
29	201120575223.2	一体化光纤红外测温装置	实用新型
30	ZL201120576072.2	无线开关柜测温系统	实用新型
...	...	...	...

九、推广应用建议

- 1 变压器绕组荧光光纤温控技术，为变压器内部温度监测提供了一种安全、可靠、有效的技术手段，该技术可在保障设备安全运行的前提下，提高设备负荷的使用，延长变压器的使用寿命，减少设备维护和更新费用，最终为提高变压器本体的智能化水平、确保变压器经济运行提供良好的基础。
- 2 该技术是智能电网关键技术，一次设备智能化核心技术，成果应用直接面向设备生产厂家和运行部门，符合国家电力发展产业规划。
- 3 建议国家电网加速推广应用该技术。



国家电网
STATE GRID

汇报完毕，谢谢！

