

# 中国电力系统稳定控制技术的开创者

## ——孙光辉



2016年7月在波士顿接受顾毓琇奖牌



### 艰难求学 白手起家 开创稳控事业

1938年，孙光辉出生在山东省胶东地区一个农村的普通家庭，那时人多地少，生活贫困。他在抗日战争、解放战争的战乱与艰苦环境中度过了童年。他十岁之前没有连续念过书，直到1949年新中国成立后才随父进城，有了一个和平的学习环境。从此，从插班四年级下学期才开始了他的学习之路。由于深感上学不易，孙光辉加倍努力学习，仅用了半年时间就跟上了其他同学，从初小毕业，并考上了当地的重

点中学。童年的经历锻炼了他吃苦耐劳、坚忍不拔的性格。中学、大学期间他的学习成绩一直很好，全是“5分”（学习当时苏联的五分制），而且经常主动、耐心地帮助成绩较差的同学。受到物理老师的启蒙，他中学时就热爱科学和工程，常常摆弄一些电子器件。中学毕业后考入了著名的哈尔滨工业大学电机工程系。1961年，由于全国大学院系调整，电力系统专业的师生都并入“北京电力学院”（华北电力大学前身）。受专业老师的影响，孙光辉在校期间就对电力系统稳定这门专业课情有独钟。

1963年，孙光辉的大学毕业设计是在水电部技术改进局（中国电科院前身）完成的。当时正赶上国内最大的水电站——新安江水电站投产，经国内第一条220kV新安江—杭州—上海线路送电到上海，所以孙光辉有机会最早参与了该项目稳定问题的研究工作。由于毕业设计论文出色，孙光辉毕业后不仅留在技改局系统室，还独立承担了“新安江水电站电气制动及切机稳定控制装置”

的研制工作。当时这方面在国内还是一片空白，国外也只有前苏联的古比雪夫水电站开始采用电气制动措施，但查不到任何可供参考的资料，且任务紧迫，只能白手起家，一切从头做起。

刚一开始，孙光辉就遇到了一系列技术难题。例如，关键的系统状态量——有功功率  $P$  如何快速测量？电流  $i$  与电压  $u$  的乘法怎么实现？功率突变量  $\Delta P$  怎么形成？系统故障前的运行工况怎么存储？装置的结构应该是什么样子？而当时，二极管都是靠进口的稀罕器件，放大器处在电子管时代，触发回路只能依靠极化继电器实现；技改局在装置设计与制造方面很薄弱。这些越不过去的关键技术，对一个刚出校门的学生来说无疑是难度巨大。在老同志的指点与支持下，凭着一股初生牛犊不怕虎的精神，孙光辉几乎天天泡在实验室里，从稳定分析计算（当时最先进的计算工具就是引进前苏联的交流计算台）、稳控策略制定、装置原理设计、元器件采购到各组件的搭建和反复试验，只能边学习、边修改、边完成。为了设计装置的结构，他专程去上海继电器厂参观学习距离保护装置（机电型）的屏柜结构。经过孙光辉不懈的努力，不到一年时间，各项关键技术难题都被一一攻克，把国内第一套稳控装置和控制屏柜研制出来了。例如，利用硒堆（动模实验室剩余备品）具有近似平方的特性，采用公式，实现了  $u$  与  $i$  的乘积运算。该运算方法（20世纪八十年代初，改进用二极管与精密电阻组成多段折线，提高了平方器的精度和生产效率）一直被应用到20世纪九十年代采用集成电路的乘法器和单片微机为止。现在看起来简单到一条指令就能实现的乘法运算，在20世纪六十年代是多么艰难呀。除此之外，孙光辉还解决了大容量电阻器（一期容量70MW，为节约投资而利用电厂基建剩余的扁铁组装，20世纪八十年代后更换为合金电阻）的设计和试验、制动电阻的快速投入与切除等技术问题，保证了电气制动措施按期顺利投运。

这就是我国第一套电力系统稳控装置的诞生过程。该装置和制动电阻在1964年下半年成功投运，比日本早了一年，比美国早了近20年，一直用到20世纪八十年代。1965年，孙光辉又为湖南电网的柘溪水电站送出工程研制了第二套稳控装置，并于1966年正式投运。该装置在技术上更加完善，增加了远方故障信号传递（使用电子管型的高频收发信机）；为节约投资和占地，又主持研制了基于廉价的大功率（140MW）水电阻器做制动电阻。国内第一、二套稳控装置的连续成功投运，为后来国内稳控装置和稳控系统的研制奠定了良好基础。这些装置的投运已经五十多年，但稳控装置的基本原理、基本功能和构架至今变化不大。



1964年我国第一套稳定控制装置调试现场



## 时代需要 牵头研制安全自动装置

十年动乱期间，国内共发生了 210 次大停电事故，电网的安全稳定问题亟待解决。

1981 年，原电力部在大连及时召开了电网稳定工作会议，会上首次颁布了《电力系统安全稳定导则》(第一版)，要求各电网的“一把手”亲自抓电网稳定工作，并提出尽快研究确保电网安全的“安全自动装置”，指定南京自动化所(国网电科院前身)为归口单位，指定孙光辉为全国安全自动装置研制工作的带头人。

时代的需求就是奋斗的目标。孙光辉抓住机遇，站到了我国电力系统安全稳定控制事业的最前沿，不仅为电力系统安全稳定运行研制出各种最急需的控制设备，还在全国安全自动装置研发、新技术推广与交流、标准的制定、新技术培训(调度、设计、运维)等方面做了大量技术与组织工作。在 1982 年 7 月、1983 年 12 月及 1985 年 1 月接连组织召开了三次全国范围的安全自动装置重要会议，原电力部有关领导亲自参加和主持，讲形势、提要求，推动开展安全自动装置的研究工作。孙光辉从工作启动、起草相关规定和装置产品的研制计划，到成果交流，一直承担了主要工作。

## 成功研制高精度数字频率继电器 彻底改变低频减载落后状态

1983 年 12 月在四川召开的安全自动装置第二次会议上，原电力部领导指出，我国已经形成东北、华东、华北三个 3000MW 以上的大电网，由于严重缺电，备用不足，经常出现低频运行，频率崩溃事故频发。当时，由于使用的频率继电器基本还是引进前苏联的感应型老式周波继电器，我国电网低频减载频率测量误差大( $\pm 0.25\text{Hz}$ )，延时不准确，导致选择性差，低频减载轮次少、延时长，严重不适应电网的需求，迫切需要更新换代。会上，有关领导直接点名孙光辉“必须立即研制高精度的频率继电器，要立军令状，一年内拿出满足要求的产品”，并指定由华东电管局牵头代表电网全力给予配合。会上提出的目标频率测量精度为 $\pm 0.1\text{Hz}$ ，延时误差 1%。要将精度从 $\pm 0.25\text{ Hz}$ 提升到 $\pm 0.1\text{ Hz}$ ，是一个很大的提高。但只有精度达到 $\pm 0.1\text{Hz}$ ，才有可能使低频减载级差从 $0.5\text{Hz}$ 缩减至 $0.2 \sim 0.25\text{Hz}$ ，基本满足电网的控制要求。



1984年介绍新研制的高精度SZH-1型数字频率继电器

20 世纪八十年代初的技术条件很有限，在电力系统内集成电路还刚刚开始应用。孙光辉经过调研和评估，决定采用集成数字电路和由运算放大器驱动的方案，彻底抛弃了传统的 LC 谐振测频方法。该方法利用了由晶体振荡电路产生的高精度高频脉冲，由数字计数器实现每个工频周期的计数，将频率定值换算成一个周期的计数值就可用数字拨盘开关直接进行频率定值整定，延时也同样采用计数方式。方案确定后，孙光辉立即搭电路试验，连 1984 年的春节假期都没有休息，3 个月内完成了初样机的试验，测试结果超出预期，频率精度达到 $0.015\text{Hz}$ 。华东电管局立即主持召开全国专家讨论会，见证了测试结果，专家们一致支持孙光辉选用的技术方案。为便

于现场全面大批量更换，会上建议采用与原来继电器外壳相同尺寸、接线端子定义一致的整机设计方案。经过反复改进，于 1984 年底生产出多套正式产品 SZH-1A/1B 样机，在南京进行了全国所有同类产品的严格型式试验。历经十余天，SZH-1A、B 型频率继电器成为唯一满足要求的产品。按原电力部要求，该装置立即在华东、京津唐、东北三大电网投入试运行，开通过多台套、多地区半年以上的跳闸运行。1985 年 11 月，原电力部主持召开了部级鉴定会，并以〔（86）电生字第 134 号文〕要求全国电网全面推广 SZH-1 型频率继电器（这是电力产品推广应用史上空前绝后的一次）。依此数字频率继电器为基础，各大区电网都制定了本网低频减载新方案，编制了产品规范和相应标准。该型频率继电器技术转产后生产了数万台套，在我国得到了全面应用，彻底改变了国内低频减载与高频切机的落后状态，杜绝了电网的频率崩溃事故。直到 20 世纪九十年代中期，随着单片微机技术的应用，孙光辉研制完成了性能更优的第三代微机型低频低压综合减载装置，才逐步取代了 SZH 型数字频率继电器。该微机型低频低压减载装置一直沿用至今，二十多年来，其原理、测量、判据、检测方法和装置标准都基本没有变化，为电力系统的频率稳定作出了卓越贡献。

### 成功实现自动躲过短路故障的低压减载技术

20 世纪八九十年代，电网的电压稳定问题很突出，电压崩溃事故时有发生。经过研究分析，孙光辉认为，当时低压减载装置中的延时设置过长是主要原因。为了防止由短路引起的低压事故造成装置误动作，当时低压减载装置采用的延时都长达 5s 以上（国外至今仍沿用此值），在发生低电压崩溃事故时基本起不到作用，而缩短动作延时又经常出现误动切除负荷，因此现场不得不增加延时或被迫退出运行，使低压减载措施形同虚设。为了解决依靠延时无法区分低电压事故与系统短路故障（后备保护动作延时较长）的难题，他深入分析了低电压事故与短路故障的特征与两者的区别，提出了“自动躲过短路故障”技术方案，在低压减载软件中编制了自动躲过短路的标准模块，只要发生短路故障就自动进入该模块程序并闭锁装置，故障切除后立即自动解除闭锁。经过反复试验和动模测试，充分验证了该模块的正确性，从 20 世纪九十年代中期投运至今，现场运行情况一直良好，国内低压减载装置延时设置为 0.2 ~ 0.5s，再没有发生过误动作，从而有效地防止了电网低电压崩溃事故。

### 成功研制出无需整定的电网失步判据

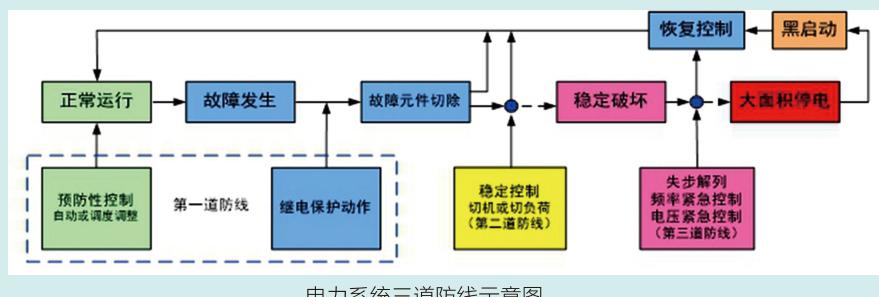
电力系统遭遇多重严重事故后，很难完全避免稳定破坏继而出现失步振荡，为此必须依靠第三道防线的重要设备——失步解列装置，在预定的输电断面将电网解列为两个可以同时继续独立运行的分区电网，从而避免了电网崩溃。20 世纪九十年代之前，国内电网采用的都是基于阻抗圆原理的失步判据，但“等值阻抗定值”的计算和整定是电网运行方式专业人员的一大难题。孙光辉看在眼里急在心里，决心寻找一种无需定值整定的失步判据。经过一段时间的思考和反复论证，期间画了无数的相量图，孙光辉终于在 1995 年首次提出并实现了无需整定的相位角  $\varphi$  原理的失步判据，通过大量模拟试验验证和现场试运行，经历多次电网失步振荡事故的正确动作和非失步振荡事故的正确“不动作”考验，相位角  $\varphi$  原理的失步解列装置很快在电网得到推

广泛应用。2002年，他又首次将 $U\cos\phi$ 原理应用于电网失步判据，同样取得了成功。以上这两种原理的失步判据及其提出的确定振荡中心范围的辅助判据，在国内电网和电厂中获得全面应用。2009年，他又提出基于光纤同步采样技术的电网多点母线电压相角差 $\theta$ 原理的失步判据，并在南方电网得到成功应用。基于该判据的广域失步解列系统能精确定位失步振荡中心位置。此后，他依据这一原理，又进一步提出基于电力系统同调机群的广域失步解列系统构架，为未来大型复杂交流电网的失步解列技术研究指明了方向。

孙光辉主持研发的集成电路与微机两代低频及低压减载装置、基于相位角 $\varphi$ 和基于 $U\cos\phi$ 两种失步判据的失步解列装置均在全国各类电网普遍应用。从20世纪八十年代开始，我国电力系统在这一领域从未购买或引进国外同类产品，由于该产品技术性能明显优于国外，所以十多年来已销往俄罗斯和亚非拉等多国，占有了一定的国际市场份额。

### 推动并完善“三道防线”的控制理念

现今在我国电力行业，“三道防线”对确保电力系统安全稳定运行的巨大作用已成为业界人士的共识，其控制理念也已深入人心。孙光辉对“三道防线”作出了杰出贡献。《电力系统安全稳定导则》颁布后，一些专家曾把“导则”中规定的三级稳定标准误称为“三道防线”。实际上，《导则》规定的三级稳定标准的要求与为实现该要求而采用的控制手段及措施之间的内涵是不同的，前者是电网的安全设防要求，后者则是采用什么手段来满足这些设防要求。在DL/T723—2000版《电力系统安全稳定控制技术导则》（第二版）（孙光辉是主要编写者）中虽提及了“三道防线”，但尚未给出明确的定义。给“三道防线”的控制理念下一个准确的定义是孙光辉多年来义不容辞的责任。2003年和2004年，中国电机工程学会分别在成都和南京召开的关于防止大停电事故的电力论坛上，他在主旨报告中均对“三道防线”控制理念作了全面阐述，并在其后的多次学术会议上介绍了“三道防线”的控制理念，在编制国标GB/T26399—2011版《电力系统安全稳定控制技术导则》（第三版）时更是明确将“三道防线”的定义写入国家标准，对每一道防线的控制内容作了具体规定，统一了业内人士的认识。



电力系统三道防线示意图

### 为新能源并网技术添砖加瓦

孙光辉年过八旬后不再按时上班了，但仍一直念念不忘他所开创的电力系统稳定控制事业，仍坚持受邀参加有关学术交流和标准讨论、技术培训等活动。值得一提的是，近几年来他学习并参与了以风电、光伏为主的新能源并网技术研讨，提出了一些有益的建议和观点，为新能源技术健康发展作出了贡献。

自 2015 年下半年开始，孙光辉对新疆哈密地区风电大规模并网诱发的次同步振荡做了深入分析，提出了现场对广域次同步全新的检测、记录和分析方案。在对该系统记录的大量数据分析的基础上，明确指出风电变流器（含逆变器）输出电流中的间谐波是诱发次同步振荡的主要原因，通过优化变流器的调节参数就能解决这类次同步振荡问题，并提出了以风电为主的送端电网抑制次同步振荡的控制方案。孙光辉提出的两个技术方案在新疆电网很快得到实施，既从理论上清楚分析了此类次同步振荡的机理，又化解了现场的燃眉之急。

2017 年初，孙光辉依据同步发电机组和电力系统的动态特性（尤其是他所提出的“电力系统动态过程三阶段”理论），提出新能源使用的变流器在理论上就不可能模拟同步发电机组的惯量和动态特性，并在多次学术会议上论证了“虚拟同步发电机”概念的错误之处，纠正了国内新能源领域热衷搞“虚拟同步发电机”的方向。他认为，应充分发挥电力电子器件具有的快速调节特长，而不是舍快求慢、试图盲目去模拟同步机组的固有特性。他的论点得到业界主流专家、学者的赞同。

孙光辉在 2017 年下半年率先提出光伏电站快速参与电力系统一次调频、调压的技术方案。南瑞继保公司当年在西藏电网现场实现了本站 30ms、远方 60ms 的有功功率和无功功率的快速调节与控制技术。2018 年，该技术与产品通过了中国电机工程学会组织的技术鉴定。这一创新技术已开始在国内推广应用，改变了新能源参与一次调频的落后状态。

近几年，孙光辉在新能源并网技术方面边学习边思考，为新能源技术发展添砖加瓦，既对电力系统有所贡献，同时也丰富了其晚年生活。



## 坚忍不拔 一生进取

人的一生能干成几件有意义的实事是不易的。孙光辉在电网安全稳定控制技术领域，经过长期的不懈努力，克服了重重困难，开创了一套完整体系。从

单站稳控装置，到大区复杂庞大的稳控系统；从提出离线分析编制稳控策略表，到在线按实时数据信息、快速自动形成并刷新稳控策略表；从简单的高精度的数字频率继电器，到功能齐全的低频减载装置，能自动躲过短路故障、快速可靠的低电压减载装置；从单站的新原理的失步解列装置，到提出基于全网同调机群之间相位角变化的复杂大电网失步解列系统；从局部电网低频振荡监测与解列装置，到实现基于广域信息的低频振荡源定位及大电网低频振荡检测与控制系统，全面完整配套并完善了电力系统第二与第三道防线的控制设备。这些工作既有严格的理论体系、又有工程的实践，综合解决了大电网面临的安全稳定问题，不断完善了“三道防线”



荣获国家科学技术进步二等奖



孙光辉教授工作照

全国同行朋友不仅仅是紧密的工作伙伴，更是亲密的朋友，亦师亦友；感谢数十年来先后和我共事过的同事们，正是他们的共同努力，无私奉献和艰辛付出，才最终共同完成了这些成果。”

#### 以下几点经验和体会，谨供年轻同志借鉴：

**坚持科研以电网存在的实际问题为导向。**孙光辉所研究的项目和设备都是电网安全稳定运行中迫切需要的，目标明确、任务紧迫，研制出来装置就能在电网立即挂网试运，研究的成果能迅速推广，全国电网就是稳控新技术的试验与验证的“实验基地”。

**服从大局需要，干一行专一行。**孙光辉于1972年初来到南京。起初三年当晶体管型继电保护装置的调试工，从1975年参与筹建南京自动化所的“动态模拟实验室”，为国产500kV晶体管继电保护搭建试验平台，这一干就是7年。从设计、设备制造、安装施工到全套模拟设备调试完工，按时交付使用，没有现成设备就自己研制，如新型自动短路试验台、电力电子的负阻器、自动机组程序启停控制装置等等。这些创新的设备不仅武装了动模实验室，还供货给全国其他动模实验室，他自己也由动模技术外行变成了全国资深的动模试验专家，还获得江苏省科技成果二等奖。“动模”就是一个微型电力系统。建动模的过程也是他深入理解和掌握电力系统物理结构和动态的过程，对后来开展稳定控制技术研究帮助很大。在那个恶补外语、纷纷出国当访问学者的年代，他却默默地、日以继夜地忙于动模建设，错失了出国深造的机会，人生可能就是这样，有得必有失。

**科研之路没有捷径，目标方向要正确，还需扎实的基本功和坚韧的创新精神。**孙光辉一直非常注重掌握基本物理概念，遇事一定先从物理概念上去理解，决不盲从。只有基本概念清晰，灵活抓住事物的本质，运用掌握的知识，才能找出解决问题的途径，不被“权威”忽悠。前辈王梅义先生曾对孙光辉说：“现在计算机、通信等新技术发展很快，技术手段先进，但电工基础的基本理论没变，电力系统的发、输、配、供的基本构成和原理没变，今后也难有质的变化。”我们学习新技术一定要为电力系统这个基本对象服务，应充分了解和掌握电力系统的经典理论和科学规律，才能有针对性地解决电网中存在的问题。从事科研还需要一股坚忍不拔的精神，研究与创新不可能一帆风顺，挫折甚至失败总会伴随，他一直深信，最困难的时候也可能是最接近成功的时候，坚持下去就一定会有所突破。

的控制理念。

孙光辉之所以能够在稳定控制技术领域开创出一片新天地，除了刻苦钻研、百折不挠，经受住各种难以想象的挫折外，他还深有感触地讲：“要感谢历届领导给予的信任和支持，放手让我自由地选择自己想干的事；更要感谢国内电力行业朋友们的鼎力支持与真诚帮助，是他们的合作与配合，精心做好现场调试、运行维护，及时反馈现场出现的问题。对装置研发过程中存在的缺陷、甚至给电网造成的损失（软件的BUG曾引起装置误动，造成现场切机、切负荷），在查清原因、毫无保留的解释后，有关电网的朋友们一直持包容和充分理解的态度，积极帮助提出解决的建议。正是他们的协助才使研制的装置能够不断完善和性能逐步提高，我与

