

CHUANLIAN BUCHANG GONGCHENG XIANCHANG JISHU

串联补偿工程 现场技术

中国南方电网超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

CHUANLIAN BUCHANG GONGCHENG XIANCHANG JISHU

串联补偿工程 现场技术

中国南方电网超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分六章，第一章介绍了串联补偿技术的发展以及实际工程应用；第二章介绍了串联补偿系统基本工作原理；第三章介绍了串联补偿系统一次部分各组成设备；第四章介绍了串联补偿系统二次部分各组成单元；第五章介绍了串联补偿系统调试、预试、定检，以及串联电容器的维护；第六章介绍了几个工程实际中的典型故障案例。

本书可供从事输变电系统运行、检修工作的人员使用，也可作为相关人员培训用参考书。

图书在版编目（CIP）数据

串联补偿工程现场技术 / 中国南方电网超高压输电公司组编. —北京：中国电力出版社，2014.8

ISBN 978-7-5123-5317-6

I. ①串… II. ①中… III. ①配电线串联补偿 IV. ①TM714.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 293805 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 8 月 第一版 2014 年 8 月 北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 9 印张 114 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

《串联补偿工程现场技术》

编 著 委 员 会

主 任 钱 海

副主任 周尚礼 吕金壮 王海军

审核组 刘 琳 卢志良 陈 岳 姜宪法

刘 彬 苏 晓

主 编 王 奇

副主编 蔡延雷 刘启胜

编写组 唐金昆 顾保全 陈彦州 张 晗

罗 禹 李亚萌 李秀林 余雪萍

前言

社会的发展和科学技术的进步，对电力生产、传输及供给在可靠性、电能质量以及保护环境等方面的要求越来越高，提高电力输电网的效益及经济性是电力工业始终追求的目标，串联补偿技术正是解决上述问题的有效措施之一。目前国内外超高压及特高压输电网已有多套串联补偿工程投入实际使用，在提高电网的综合利用效率、安全稳定水平和供电可靠性，降低电网单位输电能力投资、输电损耗，优化电网的技术经济指标，提高输电网电能的输送能力等方面发挥了巨大作用。

本书在实际串联补偿系统运行经验的基础上，对串联补偿工程技术进行了总结分析。本书介绍了串联补偿技术的发展以及实际工程应用、串联补偿基本工作原理、串联补偿一次部分各组成设备、串联补偿二次部分各组成单元、串联补偿系统调试、串联补偿系统预试、串联补偿系统定检、串联电容器维护等内容，最后介绍了几个工程实际中的典型故障案例。

本书由南方电网超高压输电公司检修试验中心王奇主编，检修试验中心蔡延雷和武汉大学电气工程学院刘启胜进行具体编写和校稿工作，检修试验中心唐金昆、顾保全、陈彦州、张晗与武汉大学电气工程学院罗禹、李亚萌、李秀林、余雪萍参与了各章节的编写和整理工作。

本书在编写过程，参考了部分专家学者的专著及相关单位的技术资料，得到了国内外设备制造厂商的大力支持，在此一并感谢。限于编者水平和经验，书中难免存在不足之处，望读者不吝指正。

编 者

2013 年 12 月于广州

目 录

前言

第一章 概论

第一节 串联补偿技术的发展	3
第二节 串联补偿工程应用	6

第二章 串联补偿原理

第一节 固定串联补偿的原理及作用	17
第二节 TCSC 的基本工作原理	18
第三节 TCSC 的工作模式	22

第三章 串联补偿一次设备

第一节 串联补偿平台	25
第二节 电容器组	27
第三节 晶闸管组件	31
第四节 晶闸管控制电抗器	34
第五节 金属氧化物限压器	36
第六节 保护间隙	40
第七节 阻尼装置	46

第八节	旁路断路器	50
第九节	隔离开关	54

❖ 第四章 串联补偿二次设备

第一节	测量系统	59
第二节	控制系统	63
第三节	保护系统	70
第四节	监控系统	85

❖ 第五章 串联补偿系统现场试验及运行维护

第一节	串联补偿系统调试	91
第二节	串联补偿系统预试	98
第三节	串联补偿系统定检	103
第四节	串联电容器维护	112

❖ 第六章 典型故障案例介绍

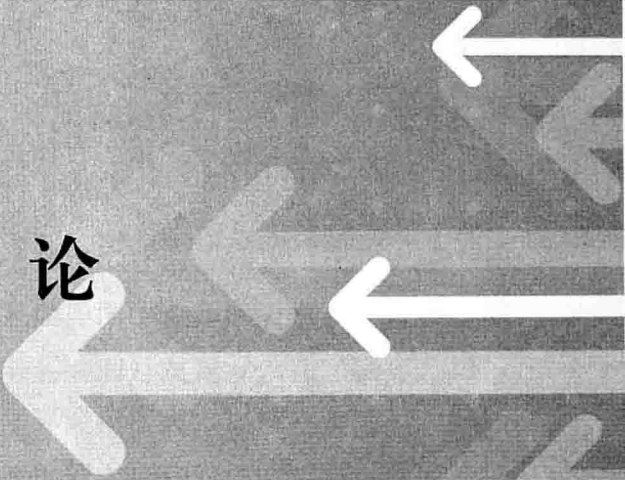
第一节	串补电容器不平衡保护动作	121
第二节	区外故障间隙自触发	124
第三节	MOV 限压器压力释放	126
第四节	光纤测量回路异常	130

参考文献	135
------	-----



第一章

概 论



第一节 串联补偿技术的发展

电力工业是国民经济战略性基础产业，电气化是现代社会发展水平的重要标志，电力作为基础能源与现代社会息息相关。目前，电能还不能大量储存，电能的生产、输送和消费必须瞬时平衡。同时，由于煤炭、水利等自然资源分布不均衡，区域经济分布不均衡，这就需要资源丰富地区通过长距离输电向经济发达、用电负荷大的地区送电，输电系统已经成为现代电力系统的重要组成部分。

现代电力系统普遍面临在保持系统稳定运行的前提下，在增大电力输送能力的同时，对优化系统运行能力方面提出了更高的要求。在我国，随着三峡工程、西南水电基地和西北煤电基地的开发建设，在“西电东送”、南北互供、全国联网的要求下，迫切需要采用新技术以解决大容量、远距离输电问题。与直流输电相比，交流输电能力受到较多的限制，根本原因是交流输电中有相角、无功和电抗三个参量，带来了交流输电线路的稳定和输送极限的问题。利用电力电子器件的特性，可根据提高输电能力的需要，快速地改变这三个参数，对输电功率的大小、流向进行有效地调控。从效益上看，灵活交流输电系统技术以其特有的大功率、高速、精确连续的控制，代替了传统的机械、电子和电磁的控制手段，使交流输电系统的功率具有高度的可控性，且可按计划路径流动。

串联补偿（简称“串补”）技术是一种提高交流输电线路稳定极限的经济、有效的手段。相对传统的输变电工程，串补工程具有耕地占地少、工程量小等特点。目前，串联补偿作为提高线路输电能力的手段在我国的电网规划中越来越受到各方的关注。电力系统串联补偿的基本思想是，通过在传输线上串接入一定的设备，改变线路的静态和动态特性，从而达到改善电网运行性能的目的。可控串联补偿（thyristor controlled series

compensation, TCSC) 技术是常规串补技术与电力电子技术的结合。通常, 串联补偿特指串联电容补偿 (固定串联补偿 FSC) 和可控串联电容补偿 (TCSC)。在交流输电系统中利用串联电容器的容性阻抗, 补偿输电线的部分感性阻抗, 使得发电机组间电气距离缩短, 同步力矩增加, 达到改善系统稳定性, 减少功率输送引起的电压降和功角差, 从而提高电力系统稳定运行水平, 扩大线路输送容量, 提高网络实际输送能力的目的。采用可控串联补偿 (简称“可控串补”) 技术可以进一步提高电网的输电能力和电力系统稳定性, 抑制电力系统低频振荡和次同步谐振。

串联补偿技术始于 1928 年, 美国纽约电力和照明公司 (NY Power & Light) 在 33kV 系统中首先采用串联补偿装置, 串补度为 100%, 以均衡输电线间潮流。此后, 苏联、瑞典、日本等国在 3~35kV 系统中也采用了串补技术。国外电力系统应用串联补偿技术的发展历程见表 1-1。

表 1-1 国外电力系统应用串联补偿技术的发展历程

时间	国名	线路电压等级	简介
1928 年	美国	33kV	第一次应用串补技术, 补偿度为 100%, 均衡网络潮流
20 世纪 40 年代	苏联	3~35kV	推广串补技术, 改善配电网电压
1950 年	瑞典	220kV	第一次在 220kV 线路应用串补技术, 线路长 480km, 补偿度为 20%, 提高输送容量 25%
1954 年	瑞典	380kV	第一次在 380kV 线路应用串补技术
1956 年	苏联	400kV	第一次在 400kV 线路应用串补技术
1968 年	美国	500kV	第一次在 500kV 线路应用串补技术
1979 年	美国		第一次用氧化锌非线性电阻作串补电容器组的过电压保护
1989 年	巴西	750kV	第一次在 750kV 线路应用串补技术
1991 年	美国	345kV	第一次在 345kV 线路应用可控串补技术

从 20 世纪 50 年代开始, 串补技术才真正开始在输电系统推广应用, 并发挥重要作用。截止 2005 年底, 全世界大约有 500 套串补装置先后投入运行, 覆盖了当今运行的所有输电电压等级。

我国从 1954 年开始研究和采用串补技术。20 世纪 60 年代至今, 我国先后在 6~35kV 配电网和 110、220、330kV 和 500kV 系统采用了串补技术。国内电力系统应用串联补偿技术的发展历程见表 1-2。

表 1-2 国内电力系统应用串联补偿技术的发展历程

时 间	地点或线路名称	电压等级	简 介
1954 年	东北、华北、华东等地区	3~35kV	改善配电网络电压
1966 年	新安江至杭州线路	220kV	国内第一次在 220kV 线路应用串补技术
1972 年	刘家峡至关中线路	330kV	国内第一次在 330kV 线路应用串补技术, 在秦安和汤峪两个变电站设置串补装置, 补偿度为 30%, 提高输送容量 20%
2000 年	阳城至淮阴线路	500kV	国内第一次在 500kV 线路应用串补技术, 提高线路输送容量
2001 年	大同至房山线路	500kV	改善电力系统稳定性, 提高线路输送容量
2003 年	平果可控串补	500kV	我国第一个可控串补, 采用了直接光触发技术

20 世纪 90 年代, 与发达国家相比, 我国电网技术水平存在明显差距。主要是 500kV 电网线路输送能力偏低。我国当时正处在 500kV 网络初步形成、220kV 电网逐步改造实现分区运行的发展阶段, 电网运行中存在的主要问题是输送容量较低。受暂稳极限限制, 500kV 长距离送电线路输送能力在 60 万~100 万 kW, 与国外相比有 40 万~80 万 kW 的差距。

我国对可控串补基础理论和关键技术的系统性研究始于 1995 年。在国家自然科学基金会、原电力工业部和东北电管局的资助下, 中国电力科学研究院、清华大学、东北电力公司等十多家单位共同参与, 历时 4 年多,

对可控串补进行了较为系统、全面的研究，基本掌握了可控串补的关键和核心技术，解决了提高系统暂态稳定水平、阻尼低频振荡和次同步谐振的控制策略、方法和控制器设计等关键技术问题；提出了装置和系统主要设备及元件的参数和技术规范；建立和完善了可控串补技术分析和模拟仿真手段；形成了独立设计可控串补系统的能力，为工程实施提供全面系统可靠的科学依据。

2004 年 12 月，我国第一套国产化串补装置——甘肃成碧可控串补装置顺利投运，国产化串补实现了零的突破。2007 年 10 月，我国自主研发的世界上容量最大、额定电压最高的可控串补装置在东北伊敏至冯屯双回 500kV 线路上投入运行。作为伊冯串补工程项目的承担单位，中国电力科学研究院圆满完成了关键技术研制等任务，并在系统分析和设计、系统集成、核心设备研制及技术规程规范等方面取得重大突破，不但使我国具备了可控串补工业化应用的能力，掌握了高寒地区大容量可控串补的全套技术，而且打破了国外公司在超高压可控串补技术领域多年来的技术垄断，大幅度降低了设备造价，增强国内电力装备业的核心竞争力，为我国电网发展提供了强劲的技术支撑。随着串联补偿在国内运行经验的不断积累，其优越性逐渐得到认可，今后可望得到更广泛的应用。

第二节 串联补偿工程应用

一、国外典型串补工程应用

1. Kanawha River 变电站可控串补

1991 年，首套可控串补（TCSC）装置由 ABB 公司制造并在 AEP 电网东南部的 Kanawha River 变电站投入运行。该工程的主要参数为：额定容量 788Mvar；额定电流 2500A；额定容抗 42Ω ；额定电压 345kV；补偿

度 60%。每相都由两个平台构成,一个平台由 10% (7Ω) 和 20% (14Ω) 两段构成,另一个平台是一段 30% (21Ω),这样可以使补偿度在 0 与 60% 之间变化。建设该 TCSC 装置的目的是为了消除网内 765kV 线路停运时 Kanawha-Ftmk 345kV 线路及并联的 138kV 线路出现的过载现象,同时调节网损。

2. Kayenta 变电站先进型串补

1992 年,由西门子公司制造的先进型串补 (advanced series compensation, ASC) 在美国 WAPA 的 Kayenta 变电站投入运行。该站位于 Glen Canyon 至 Shiprock 320km 203kV 输电线路的中部。Kayenta 变电站由 2 个串补单元构成,每个单元的额定容量为 165Mvar,额定电流 1000A,60Hz 时每相电容器阻抗为 55Ω 。该站的建成大大提高了输电线路的传输能力。

3. Slatt 变电站可控串补

1993 年,由 GE 公司制造的 TCSC 装置正式在美国 BPA 的 Slatt 变电站中被投入使用。据介绍,有 4 个电源点 (2 个水电、1 个煤电、1 个核电) 通过 500kV 输电线路接入位于 Oregon 的中北部地区的 Slatt 变电站。该站的 TCSC 由 6 个可以根据系统要求独立运行和控制的模块串联构成。该串补装置的基本参数为:基本容抗值为 8Ω (202Mvar),连续工作额定电流为 2900A,连续工作额定容抗为 9.2Ω ,30min 额定工作容抗为 12Ω ,10s 额定工作容抗为 16Ω , 8Ω 时基本串补度为 29%。这套装置建成后在改善潮流分布、抑制系统振荡和防止 SSR 方面起了很大作用。

4. Stöde 变电站可控串补

1997 年在瑞典中部的 Stöde 变电站投入由 ABB 公司提供的 TCSC 装置。该变电站位于 Stockholm 以北 400km 和 Forsmark 核电站以北 300km 处,位于北部水电向南部负荷中心送电的 400kV 线路上。该变电站由常规串补和可控串补两部分组成,总补偿度 70%,额定电流 1500A,系统电压 400kV,系统频率 50Hz;常规串补部分容抗值为 51.1Ω /相,额定容量为

345Mvar; 可控串补部分基本容抗 $18.25\Omega/\text{相}$, 额定容量 148Mvar, 额定提升系数为 1.2。该站 TCSC 的投入运行将 Foremark 核电站 3 号 1300MW 机组发生 SSR 的风险降到最低。

5. 巴西南北联络线可控串补

1999 年从巴西北部 Inperatrize 变电站到南部 Serra da Mesa 变电站的南北联网工程投入运行, 此工程全线 1020km, 中间设 3 个变电站, 全线安装 100%补偿的高压并联电抗器, 并在三个中间变电站装设 6 组固定串补 (FSC), 总补偿度 54%; 在线路两端分别安装补偿度为 6%的可控串补 (TCSC), 其容抗调节范围为补偿度 5%~15%。每组 TCSC 基本参数为: 基本容抗为 13.27Ω , 连续运行容抗为 15.92Ω , 额定电流 1500A, 额定容量为 108Mvar, 避雷器容量 19MJ 相。该串补投入后, 工程输电容量达到 1300MW。

二、国内典型串补工程应用

1. 平果可控串补站

天平双回交流线路每回长 313km, 每回线各安装一套串补装置, 安装地点为 500kV 平果变电站天平双回交流线路的进线侧。本串补工程每回线路总串补度为 40%: 其中固定串补度为 35%, 可控串补度为 5%, 串补装置额定电流为 2000A, 相应串补装置总容量为 $2\times 400\text{Mvar}$ (双回), 其中固定部分 (FSC) 容量为 $2\times 350\text{Mvar}$, 可控部分 (TCSC) 容量为 $2\times 50\text{Mvar}$ 。平果可控串补站的建设是提高南方电网稳定水平和“西电东送”能力、抑制南方电网低频振荡、进行电网潮流和电压的调节的重要手段之一, 同时作为我国第一个基于晶闸管控制的串补工程, 提高了南方电网的技术含量, 具有很强的示范作用。

2. 贺州串补站

贺州 500kV 串补站是南方电网公司西电东送网络完善工程中的一个重

要的 500kV 串补站，由美国 GE 公司供货，2009 年 6 月 4 日投运。本期工程建设了 2 套串补装置，串补装置采用固定串补装置型式，即 FSC。该工程建设的 2 套串补装置将分别装设在柳东至贺州的 I / II 回 500kV 线路（每回线路长度为 205km），该双回线路导线型号均为 LGJ-4×400。

贺州串补站 2 套串补装置（FSC）的额定容抗为 $22.57\Omega/\text{相}$ ，额定电流为 2400A/相，相应三相额定无功输出分别为 390Mvar。

3. 桂林串补站

桂林串补工程桂山乙线已于 2010 年 1 月 20 日成功投运。桂林 500kV 串补工程建设的 2 套串补装置将分别装设在桂林至贤令山的 I / II 回 500kV 线路（每回线路长度为 306km），该双回线路导线型号均为 LGJ-6×300。串补装置采用固定串补装置型式，每套按串补度 25%、25% 容量分段。桂林串补站每套串补装置（FSC）分为两个独立的分段，额定容抗为 $15.4+15.4\Omega/\text{相}$ ，额定电流为 3000A/相，相应三相额定无功输出分别为 415+415Mvar（定义为 $3X_n I_n^2$ ）。

4. 玉林串补站

玉林 500kV 串补站布置于玉林 500kV 变电站东侧，是南方电网公司西电东送网络完善工程中的一个重要的 500kV 串补站，于 2010 年 2 月投入试运行。串补装置采用固定串补装置型式，即 FSC。该工程建设的 2 套串补装置将分别装设在玉林至茂名的 I / II 回 500kV 线路（每回线路长度为 141km），该双回线路导线型号均为 LGJ-4×400。玉林串补站 2 套串补装置（FSC）的额定容抗为 $16.55\Omega/\text{相}$ ，额定电流为 2400A/相，相应三相额定无功输出分别为 286Mvar（定义为 $3X_c I_c^2$ ）。

5. 甘肃成碧可控串补工程

2004 年甘肃成碧可控串补（TCSC）工程正式投入运行。该串补工程采用一次设备混合复用方式的固定串补和可控串补混合装置，能通过一次电气切换和软件切换实现固定串补和可控串补两种模式的切换。该串补装

置安装于 220kV 碧口至成县 220kV 线路成县变电所侧,基本补偿度为 50%,基本容抗 21.7Ω ,长期工作容抗 23.9Ω ,最大提升系数 2.5,阻抗调节范围 $21.7\sim 54.2\Omega$ (容性),额定电流 1100A,额定容量 86.6Mvar,MOV 容量 10MJ/相。该串补工程的建成提高了线路的输电能力,同时节省了线路投资,保护环境,提高了电网的技术水平。

6. 伊冯可控串补工程

内蒙古东部呼盟地区,伊敏电厂所在地,有丰富的煤炭资源,该地区为东北电网的火电基地。2007 年由固定串补和可控串补串联组成的伊冯串补投入运行,该工程中,固定串补(FSC)和可控串补(TCSC)分别安装于 2 个独立平台。该串补的基本参数有:串补额定电流为 2.33kA;其中,固定串补补偿度为 30%,容抗为 $33.4\Omega/\text{相}$,容量为 544.3Mvar;可控串补补偿度为 15%,基本容抗值为 $16.71\Omega/\text{相}$,长期工作容抗为 20.05Ω ,容量为 326.6Mvar,容抗调节范围 $16.71\sim 50.19\Omega/\text{相}$ 。该串补工程的建成对提高系统暂态稳定性,抑制次同步谐振,保证伊敏电厂的电力送出起到积极作用,并为输送电能带来非常明显的环境效益和经济效益。

三、特高压串补工程应用

2006 年 8 月,国家发改委正式核准建设 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程。图 1-1 为特高压试验示范工程南阳开关站串补平台图。

1. 工程概况

特高压交流试验示范工程包括三站两线,起于山西晋东南变电站,经河南南阳开关站,止于湖北荆门变电站。工程全线单回路架设,全长 640km,先后跨越黄河和汉江。采用 1000kV, $3\times 1000\text{MVA}$ 特大容量变压器,变电容量 6000MVA,采用 1000kV 气体绝缘全封闭组合电器,双断路器接线。工程额定电压 1000kV,最高运行电压 1100kV,本期输送能力 2800MW。