

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.007

## 电力潮流灵活控制技术应用综述

李群<sup>1</sup>, 张宁宇<sup>1</sup>, 王新宝<sup>2</sup>, 丁峰峰<sup>2</sup>, 付俊波<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)、可控串联补偿装置(thyristor controlled series compensation, TCSC)和移相器(phase-shifting transformer, PST)能够调节线路参数、灵活控制潮流变化, 均已在国内外电网中实现工程应用, 对均衡输电通道潮流、提升供电能力有重要作用。文中对UPFC、SSSC、TCSC和PST的理论研究和工程实践进行了综述。首先, 分析了4种潮流控制装置的基本结构和控制原理, 并介绍了国内外已投运工程的运行情况; 其次, 从结构、换流器技术、选址定容、控制策略、故障保护5个方面对潮流控制装置的关键技术研究现状进行概述; 最后, 展望了潮流控制装置在未来电网中的典型应用场景, 并对潮流控制技术的研究方向进行了分析。

**关键词:**潮流控制; 统一潮流控制器(UPFC); 静止同步串联补偿器(SSSC); 可控串联补偿装置(TCSC); 移相器(PST); 电力电子技术

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)01-0050-11

### 0 引言

近年来, 随着我国经济水平的快速增长以及电力系统的不断建设, 电网结构和运行方式愈加复杂。在电网实际运行中, 潮流、电压面临的主要问题有: 关键输电断面潮流分布不均、局部电网供电能力不足; 大规模可再生能源随机性强, 电网潮流大范围波动难以灵活控制; 城区负荷日益增长, 区内电源减少, 电网无功支撑匮乏等。研究电网潮流灵活控制技术并实现工程应用是解决上述问题的重要途径<sup>[1-2]</sup>。

灵活控制电网潮流不仅可以均衡线路负载, 减少有功损耗, 改善运行经济性, 而且可以提高电网稳定性。传统电力系统采用固定式串联补偿装置改变线路阻抗, 虽然能改变线路的潮流分布, 但灵活性较差。随着电力电子技术的日益成熟, 统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)<sup>[3-5]</sup>、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)<sup>[6-8]</sup>、可控串联补偿装置(thyristor controlled series compensation, TCSC)<sup>[9-10]</sup>和移相器(phase-shifting transformer, PST)<sup>[11]</sup>等先进潮流控制技术得到广泛关注。UPFC作为目前控制功能最强大的交流潮流控制装置, 其串联侧输出幅值和相角可变的补偿电压, 能够同时调节线路输送的有功和

无功功率, 但是成本相对较高; SSSC在线路中串入与线路电流角度垂直的电压, 可灵活控制线路输送的有功功率, 成本比UPFC略低; TCSC通过控制晶闸管触发角实现串入线路等效阻抗的变化, 进而改变线路潮流, 技术成熟、可靠性高, 但存在一定的阻抗不可控区; PST通过控制移相角度实现潮流控制, 目前国内外已投运工程均为机械式, 仅能进行潮流的离散调节, 但成本低、运行稳定。

近年来, 国内研究机构通过联合攻关、共同研发, 先后攻克了基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术的潮流控制装置结构设计、控制保护策略、选址定容优化等关键技术, 实现了UPFC、SSSC等设备的研制及工程应用。2003年天生桥—百色500 kV TCSC工程投运、2015年12月南京西环网220 kV UPFC工程投运、2017年12月苏州500 kV UPFC工程投运, 均实现了成套装备的长期稳定运行, 为国内电网的潮流均衡和供电能力提升发挥了重要作用, 也为先进潮流控制装置的推广应用奠定了基础。此外, 上海蕴藻浜220 kV UPFC、天津石各庄220 kV SSSC工程陆续投运, 实现了不同场景下的电网潮流灵活精准控制。

文中综合灵活潮流控制技术的理论研究和工程应用实际情况, 首先分析了UPFC、SSSC、TCSC和PST等4种潮流控制装置的基本结构和原理, 并介绍了国内外已投运工程的运行情况; 然后, 从结构、选址定容、控制策略和故障保护等方面重点介绍了灵活潮流控制关键技术研究现状; 最后, 结合国内

收稿日期: 2022-08-23; 修回日期: 2022-10-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2501600); 江苏省“333工程”资助项目“电网移相器关键技术研究及应用”(BRA2020084)

新型电力系统的基本特征,针对大规模新能源随机性、间接性和波动性加剧电网潮流分布不均的问题,展望了潮流控制装置在未来电网中的应用可行性。

## 1 潮流控制的基本原理

### 1.1 统一潮流控制器(UPFC)

美国西屋科技中心的 L.Gyugyi 博士于 1991 年提出了 UPFC 的概念。目前,UPFC 是柔性交流输电系统(flexible alternating current transmission system, FACTS)元件中最具代表性、功能最强大的控制装置<sup>[12]</sup>,由 2 个共用直流侧电容的换流器组成,并分别通过变压器接入电网。其中,并联换流器和并联变压器  $T_{sh}$  统称并联侧;串联换流器和串联变压器  $T_{se}$  统称串联侧。UPFC 结构如图 1 所示。

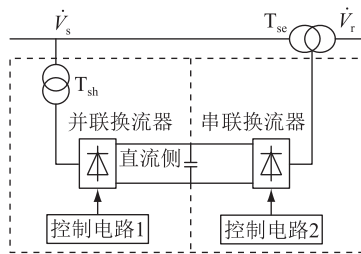


图 1 UPFC 结构

Fig.1 The structure of UPFC

串联换流器在首端节点电压  $\dot{V}_s$  和末端节点电压  $\dot{V}_r$  之间输出幅值和相角可调的电压,实现有功功率和无功功率的灵活精准控制。并联侧换流器可以向电网输出或吸收无功功率,同时具备向串联侧提供有功和电网无功电压支撑能力。

### 1.2 静止同步串联补偿器(SSSC)

SSSC 属于串联型的 FACTS 装置<sup>[13]</sup>,主要由换流器、串联变压器、旁路晶闸管(thyristor bypass switch, TBS)等构成。SSSC 结构如图 2 所示,其中 VSC 为电压源换流器。

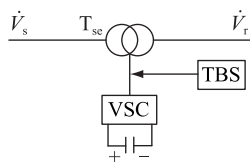


图 2 SSSC 结构

Fig.2 The structure of SSSC

SSSC 先通过换流器产生近似超前或滞后线路电流  $90^\circ$  的三相正弦同步电压<sup>[14]</sup>,再经过串联耦合变压器将该电压相量串联在输电线路中间,等效于在线路中串联一个可变电抗,从而达到改变线路传

输有功功率的目的。

### 1.3 可控串联补偿装置(TCSC)

TCSC 主要包括电容器组、旁路电感、双向晶闸管及可变电阻器等,其结构如图 3 所示。

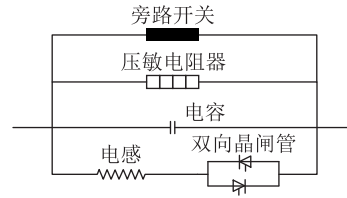


图 3 TCSC 结构

Fig.3 The structure of TCSC

TCSC 通过控制晶闸管触发角改变流过电抗器的电流值,进而改变电抗值,主要有 3 种调节模式:晶闸管闭锁模式、容抗调节模式和感抗调节模式。压敏电阻器对串联电容器有过压保护作用,电网故障电流与允许的持续时间决定压敏电阻器容量。

### 1.4 移相器(PST)

PST 包括串联变压器、并联变压器和变换装置<sup>[15-17]</sup>,图 4 为典型的双芯对称式 PST 结构。

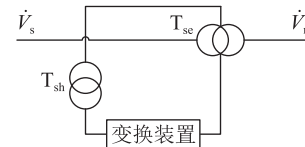


图 4 PST 结构

Fig.4 The structure of PST

PST 先通过并联变压器得到线路电压,再通过变换装置得到串入线路的补偿电压<sup>[18]</sup>,从而改变线路功率。

## 2 灵活潮流控制技术的工程应用

随着电网不断建设,网架结构日趋复杂,输电线路轻重载、潮流分布不均现象普遍存在,限制了输电能力的提升。为解决上述问题,多个国家先后开展了 UPFC、SSSC、PST 等潮流控制装置的工程应用。

2015 年 12 月,为解决南京 220 kV 西环网中关键输电断面输电能力不足、新的输电通道难以建设等实际问题,南京建成投运了世界首个基于 MMC 的 220 kV UPFC 工程。该工程投运以来,长期稳定运行,缓解了南京西环网输电断面的重载问题,最大提升西环网供电能力 60 万 kW,在保障主城区西部、河西新城、奥体新城等安全供电方面发挥重要作用<sup>[19]</sup>。文献[20]介绍了世界上电压等级最高、容量最大的苏州南部 500 kV UPFC 工程的应用情况。苏州南部电网主要电源是锦苏直流(水电直

流)以及梅里—木渎、斗山(陆桥)—熟南和东吴—全福3个500 kV交流通道。受负荷分布影响,梅里—木渎双线潮流较重,存在 $N-1$ 过载问题,限制了电网供电能力的提升。在梅木双线安装UPFC,可有效均衡各输电通道潮流,增加苏州南部电网清洁能源消纳能力约130万kW。文献[21]分析了天津石各庄SSSC科技示范工程的应用背景,该工程解决了高场—石各庄双线潮流分布不均、电力输送能力受限的问题,供电能力提升10%。文献[22]指出意大利与法国、瑞士等国家互联的北部电网受限于 $N-1$ 安全约束、电网环流等因素,输电通道实际负载率远低于理论传输极限,安装2台400 kV/1 630 MV·A、移相角为 $12^\circ$ 的PST即可实现电网输电能力的显著上升。文献[23]总结了近年来PST在国内外的工程应用情况,表明其成本较低,是挖掘电网输电潜能的有效手段。

目前已投运的南京220 kV UPFC、苏州南部500 kV UPFC、天津石各庄220 kV SSSC等工程采用电力电子技术,可以快速调节电网中的电压、电流、功角等电气参数,能有效改善系统阻尼,抑制谐波。文献[24]结合南京西环网UPFC工程,探讨了基于MMC的UPFC抑制电力系统谐振的可行性。文献[25]介绍了上海220 kV蕴藻浜UPFC示范工程,该工程通过快速发出无功功率,显著提高了蕴藻浜地区暂态电压稳定性,有效提升了上海电网的西南水电消纳能力。

此外,灵活潮流控制装置占地面积小、布置灵活,可解决城区电网土地资源稀缺、新建输电走廊施工困难等问题。文献[26]以南京220 kV西环网UPFC工程为例,对比了新增线路通道和UPFC方案,指出UPFC工程可利用现有220 kV铁北开关站预留场地建设,无需新征地,极大节约了投资。文献[27]对比了苏州南部电网新增输电通道和UPFC方案,结果表明:新建输电通道将穿越多个市区,投资巨大,且建设难度极大;采用UPFC可避免新建输电通道,节约6亿元投资和大量的土地资源。

TCSC装置相比较于其他FACTS装置,具有结构简单、易于实现的优点,因此自20世纪80年代以来,在世界范围内得到了广泛应用。1992年美国Kayenta投运世界上第一台可连续控制的TCSC装置,由2个容抗为 $55\ \Omega$ 的串联电容器组成,其中一个为固定串联补偿,另一个由容抗 $40\ \Omega$ 的固定补偿和容抗 $15\ \Omega$ 的可控补偿构成。1997年巴西投运了500 kV TCSC装置,成功抑制了低频振荡。2003年广西平果变电站建成国内首个TCSC工程,可控部

分补偿度5%,有效提升了线路输电能力。此外,2004年和2007年,先后投运了成碧和冯屯TCSC工程,有效提升了电网输电能力和系统稳定性。

传统机械式PST在欧、美等国家和地区的应用广泛。目前,北美、欧洲等国外电网已投运42台以上机械式PST,最高电压等级500 kV、穿越容量1 630 MV·A、可调角度 $\pm 85^\circ$ 。由于欧美电网普遍存在电磁环网,PST调节角度通常较大,具体如表1所示。PST在国外电网中的作用主要为:(1)提高电网间功率交换能力;(2)改善潮流分布,提高输送能力;(3)抑制电网间功率振荡;(4)控制环网潮流,降低网损。

表1 国外部分PST工程应用

Table 1 Application of some PST projects abroad

序号	国家	电压等级/ kV	穿越容量/ (MV·A)	调相角度/ ( $^\circ$ )
1	荷兰	400	1 000	$\pm 30$
2	美国	345	400	$\pm 74.5$
3	美国	138	160	$\pm 30$
4	美国	230	300	$\pm 60$
5	意大利	400	1 630	$\pm 30$

### 3 灵活潮流控制技术的研究方向

#### 3.1 系统结构

##### 3.1.1 线间潮流控制器

与UPFC不同的是,线间潮流控制器(interline power flow controller, IPFC)串联于多条输电线路,可同时对多回相邻输电通道潮流进行灵活控制<sup>[28-30]</sup>。IPFC没有并联侧换流器,但须选取一条潮流裕度较大的线路作为其辅控线路,用于稳定公共直流母线电压,具体结构如图5所示。

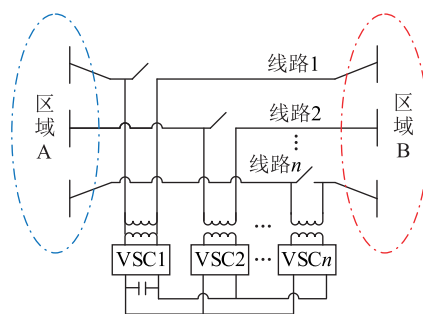


图5 IPFC结构

Fig.5 The structure of IPFC

文献[29]提出了基于功率注入的IPFC建模方法,考虑变流器容量、功率限值等约束条件,利用二进制展开、线性化等技术,实现了IPFC接入电网后的最优潮流计算。文献[30]对比了IPFC和UPFC

的结构,以江苏电网为例,对两者的技术经济性进行分析,为后续工程应用提供参考。总体而言,国内外对 IPFC 的各项研究尚且处于起步阶段,具体应用场景及实际潮流控制效果还有待进一步研究。

### 3.1.2 PST 结构

PST 按控制回路形式主要分为机械式和电力电子式,前者控制回路为机械式有载调压开关,后者控制回路为电力电子装置。机械式 PST 有载调压机构的典型结构如图 6 所示,并联变压器的副边绕组有多个抽头与有载调压开关连接,通过有载调压开关控制输出不同的补偿电压。

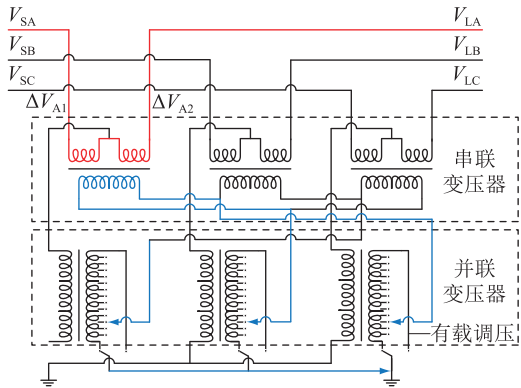


图 6 机械式 PST 典型结构

Fig.6 Typical structure of mechanical PST

图 6 中,  $V_{SA}$ 、 $V_{SB}$ 、 $V_{SC}$  分别为线路首端的 A、B、C 相电压;  $V_{LA}$ 、 $V_{LB}$ 、 $V_{LC}$  分别为线路末端的 A、B、C 相电压;  $\Delta V_{A1}$ 、 $\Delta V_{A2}$  为移相器 A 相输出电压。

机械式 PST 通过有载调压机构的调节可以控制线路有功,其投资和占地与电力电子设备相比较小,能够满足系统稳态运行的需求。但其响应速度较慢,无法满足电力系统快速响应的需求,只能分级、逐级调节,可调级数取决于并联变压器副边绕组抽头的数量。

分级可控 PST 的典型结构如图 7 所示,其控制回路替换为晶闸管等电力电子器件,并联变压器的副边由多抽头型式更改为多绕组型式,每个绕组均与由 4 组反并联晶闸管组成的桥接回路连接。

图 7 中,  $\Delta U_1$ 、 $\Delta U_2$  分别为 PST 串联侧 A 相的线路侧和阀侧电压; B1a (B2a、B3a)、B1b (B2b、B3b)、B1c (B2c、B3c) 分别为 PST 串联侧的 A、B、C 相绕组; E1a、E1b、E1c 分别为 PST 并联变压器 A、B、C 相高压侧绕组; E2a (E3a、E4a)、E2b (E3b、E4b)、E2c (E3c、E4c) 分别为 PST 并联变压器低压侧 A、B、C 相低压侧绕组;  $U_{b2}$ 、 $U_{c2}$  分别为 PST 并联变压器低压侧 B、C 相输出电压。

分级可控 PST 的可调级数取决于并联变压器

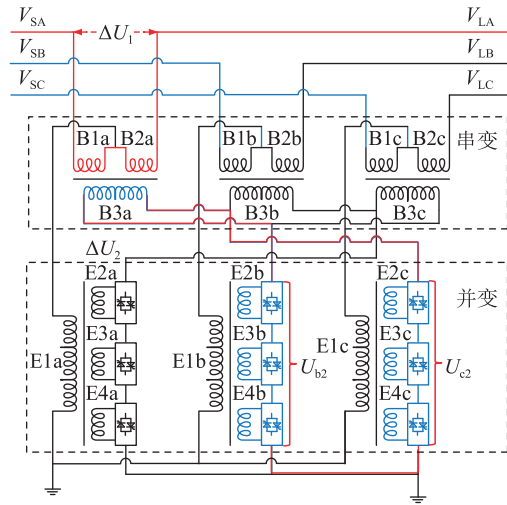


图 7 分级可控 PST 结构

Fig.7 The structure of hierarchical controllable PST

副边绕组的数量和变比,如 2 个变比为 1:3 的绕组,可调级数为  $\pm 4$  级; 3 个变比为 1:3:9 的绕组,可调级数为  $\pm 13$  级。可调级数越大,每级的调节精度越高,但同时变压器的绕组数量及电力电子器件的数量也随之增加,成本增大。

分级可控 PST 可实现补偿电压的快速调节,在满足系统稳态潮流控制需求的同时,可参与系统动态稳定的调节,如抑制系统振荡、增强暂态稳定性等。其控制相对简单,工作时无谐波,但无法连续平滑调节。

连续可控 PST 的变压器主体结构与分级可控 PST 类似,其并联变压器及阀组的结构如图 8 所示。

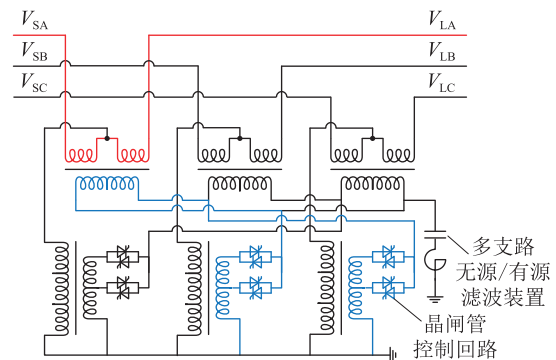


图 8 连续可控 PST 结构

Fig.8 The structure of continuous controllable PST

并联变压器副边仅 2 个抽头,分别与 2 组反并联的晶闸管阀连接,通过连续控制晶闸管的触发角,使其轮流导通,可实现输出电压基波分量幅值的连续变化。由于晶闸管只能在电流过零时关断,因此工作时不能随意控制晶闸管的导通和关断,必须根据负载的状况合理控制,其控制策略较为复杂。控制电压在不停变化时会向系统注入大量低

次谐波,须安装滤波器。

### 3.2 换流器

换流器大致可分为3类:两电平VSC、多电平VSC以及MMC。性能上看,两电平VSC谐波大、控制复杂、损耗大、体积大,且容量小、串联技术难度大,须耦合变压器提高容量。多电平VSC体积大,电容均压较为复杂和困难,实际工程应用中通常不超过5个电平,同样须耦合变压器。而MMC采用多个桥式结构子模块级联的方式,可以在输出端叠加上很高的电压,具有输出谐波少、电压输出品质高等特点<sup>[31]</sup>。MMC的通用结构如图9所示。

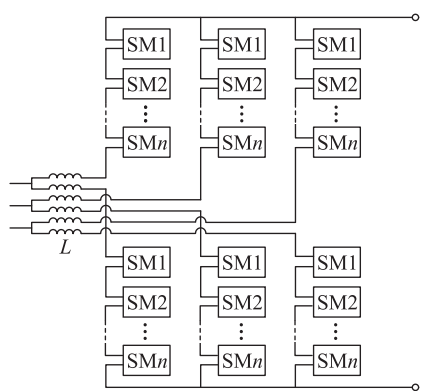


图9 MMC通用结构

Fig.9 The general structure of MMC

图9中, $L$ 为电感,SM为子模块。从图9可以看出,MMC包含3个完全相同的相单元,每一个相单元包括上下2个桥臂,单个桥臂由多个级联的子模块和1个电抗器串联而成。其中串联的电抗器能抑制相间环流,降低桥臂电流的谐波畸变率。

近年来,随着电力电子结构和换流装置结构的发展,基于MMC的灵活潮流控制技术得到广泛研究。文献[32]详细分析MMC-SSSC装置结构和控制原理,运用状态反馈线性化和积分滑模变结构控制方法对MMC-SSSC的功率控制器进行优化,既实现有功和无功的解耦控制,又提高了控制系统的鲁棒性。文献[33]基于MMC型UPFC动态模型,建立MMC型UPFC开关周期平均模型,并在实时数字仿真(real time digital simulator, RTDS)中对其内部动态特性进行仿真。文献[34]介绍了MMC-UPFC的基本结构,从交叉解耦控制策略、智能算法控制策略以及基于状态反馈控制策略3个方面分析比较,总结了MMC-UPFC交叉解耦的关键性问题。

基于上述研究成果,MMC换流技术在南京UPFC、苏州UPFC和天津SSSC等工程中得到应用。MMC-UPFC不仅可以发挥UPFC控制电网潮流和增强电力系统稳定性的作用,而且凭借MMC的新型

换流技术优势使交流侧输出的电压波形十分平滑<sup>[35]</sup>,解决了系统中的谐波问题。

MMC结构高度模块化,易于扩充,方便扩展,能够使设备满足不同电压和功率等级的需要,可以实现任意多电平的输出。基于MMC的南京220 kV和苏州500 kV UPFC工程已分别稳定运行7 a和5 a,说明MMC技术已成熟,后续可大范围推广应用至潮流控制装置。

### 3.3 潮流控制设备选址定容

SSSC、UPFC、TCSC和PST在电网中的安装位置将直接影响潮流控制效果,而安装容量的大小则会影响经济性。因此,研究潮流控制装置在电网中的选址十分必要。

文献[36]针对现有SSSC选址定容方面研究的不足,提出一种灾变变速量子遗传算法用于SSSC的选址定容优化。文献[37]引入线路有功潮流性能指数,采用有功过负荷的严重程度作为评价指标,根据SSSC参数灵敏度大小确定SSSC最优安装地点。文献[38]从UPFC改善系统可靠性的角度对UPFC选址定容进行研究,通过各线路装设UPFC对系统可靠性的灵敏度确定最优安装位置,并综合考虑投资成本和可靠性效益确定最优容量。文献[39]综合考虑了系统的可用输电能力、静态电压稳定裕度和投资费用,建立了UPFC的选址定容多目标优化模型,并将动态权重和粒子群引入万有引力搜索算法对UPFC的安装地点和补偿容量进行寻优,得到综合条件下的最优解。文献[40]将装设PST的数量和位置都作为决策变量,将装设PST后电网每年在生产成本上获得的收益与PST的总投资额的比值作为目标函数,将所有线路都作为候选安装位置,采用遗传算法寻找最优解。

目前,灵活潮流控制装置的选址定容研究主要集中在单个指标的优化问题上,而选址定容多目标优化研究还处于起步阶段。为此,应当从可靠性、稳定性和经济性等多个方面构建潮流控制设备选址定容的综合性评价标准,实现多目标优化。

### 3.4 控制器控制策略

控制策略是UPFC、SSSC、TCSC和PST等潮流控制装置的核心技术。为了更好地控制电网潮流分布,研究各潮流控制装置的控制策略具有重要意义。

潮流控制装置基本的控制方式包括比例积分(proportional integral, PI)控制、交叉解耦控制等线性控制方式。线性控制方式首先对系统进行线性化处理,然后采用线性化算法对配置问题进行求

解,当系统出现大范围变化时,不同控制元件之间的相互影响将会使原有的控制策略不再适用。随着模糊控制、人工神经网络、遗传算法等智能控制算法的蓬勃发展,各种智能技术也先后应用到潮流控制设备的控制策略中。

文献[41]提出一种模糊自整定 PI 控制方法,相较于常规的 PI 控制,该控制策略具有更快的潮流调节速度。文献[42]提出一种基于神经网络控制策略的 SSSC 新型潮流控制器,不仅可以快速调节潮流,而且可增加系统阻尼,改善系统稳定性。文献[43]充分利用遗传算法的参数优化能力和模糊控制的鲁棒性,设计出的 UPFC 模糊控制器具有响应速度快、控制精度高等优点。文献[44]对 UPFC 的控制模型进行解耦,并在此基础上设计一种基于模糊趋近率的变结构控制器。经过仿真验证,该变结构控制器不仅减弱了控制过程中的抖振,而且能够更好地追踪控制指令,实现 UPFC 维持母线电压稳定和补偿输电线路功率的功能。文献[45]针对晶闸管可控移相器(thyristor control phase shifting transformer, TCPST),提出一种优化自校正模糊 PI 控制器,利用蚁群算法对控制器的增益进行优化。

电力系统中,各个元件的控制目标不同,如果不加以协调,那么潮流控制装置和其他电气元件之间可能出现严重的交互影响。文献[46]表明,UPFC 中多组控制器之间存在负交互影响,当交互影响到达一定的严重程度时,系统可能出现闭环失稳。文献[47]研究了由开环模式耦合引起的 UPFC 与系统的强动态交互作用,并分析了其对系统机电振荡模式的影响情况。

到目前为止,潮流控制设备的协调控制技术已经取得了一定的进展。文献[48]以可用输电能力最大和投资费用最小为目标,建立了多目标优化模型,提出一种嵌套的多目标粒子群优化算法求解多约束非线性 Pareto 协同模型。文献[49]基于反馈线性化方法设计了 SSSC 和静止无功补偿器(static var compensator, SVC)协调控制器,通过控制器的协调作用大幅减少 SSSC 和 SVC 之间的负交互作用。文献[50]针对多个潮流控制设备之间存在的负交互影响,提出一种基于 Pareto 协同控制的协调控制方法,仿真结果证明设计出的协调控制器具有良好的控制效果。

现阶段针对潮流控制设备控制策略的研究主要集中在控制器本身,通过算法上的不断优化提高控制器的精度,但综合考虑电网参数以及线路运行信息的控制策略研究很少。此外,由于多个潮流控

制设备的负交互影响会对系统的稳定性造成极大影响,因此协调控制也是未来控制器控制策略的研究方向之一。

广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)通过在电网中关键测量点布置同步相角测量单元,可以对全电网中主要数据实现快速、实时的测量和采集。电力系统采用 WAMS 可以精确地测量相对功角和角频率等变化量,并快速传输信息,便于潮流控制装置的控制。文献[51]针对广域测量环境下 FACTS 阻尼控制器设计问题,建立一种计及信号传输时滞的 FACTS 阻尼控制模型,并提出以最大化阻尼比和时滞稳定裕度为目标的辅助阻尼控制器智能优化设计方法。文献[52]针对设备间缺乏协调控制所产生的负交互影响问题,设计了基于相量测量装置(phasor measuring unit, PMU)广域信息的 UPFC 附加控制器,提高了 UPFC 暂态稳定性,并由 PSCAD 仿真验证了附加控制器的有效性。

此外,WAMS 技术在潮流控制设备之间的协调控制研究也在逐渐兴起,文献[53]利用广域信号设计多台 UPFC 的协调控制策略以保持多机系统的暂态稳定性,并且考虑了时滞影响。文献[54]借助 WAMS 在线实时测量电气量的功能,详细研究了 UPFC 控制器的交互影响分析方法及其协调控制方案。

### 3.5 故障保护技术

含潮流控制装置的电力系统运行状态和控制策略复杂,对保护配置的要求较高,因此安装潮流控制装置时必须考虑潮流控制设备的保护问题。

文献[55]结合 MMC 型 UPFC 示范工程,指出变压器阀侧短引线单相接地故障过流时,差动保护灵敏度不足的问题,并给出交流测主保护、后备保护配置方案,通过仿真证实方案的可行性。文献[56]分析限流式 UPFC 的进线过流和输出过压问题,为 UPFC 实验样机设计了一套详细的保护电路,通过仿真验证了该保护电路的有效性。文献[57]考虑过渡电阻对 SSSC 旁路保护的影响,提出一种可靠的自适应距离保护方法。文献[58]重点分析 SSSC 对传统距离保护测量和阻抗继电器动作特性的影响,通过改进的小波包熵算法对故障位置进行识别,并在此基础上提出了距离保护测量阻抗的调整方案。文献[59]在分析传统 PST 保护方案缺点的基础上,提出一种采用全角度移相、数学化采样技术的 PST 差动保护方案,该保护方案不仅可以解决传统多分支 PST 无法配置差动保护的问题,而且

适用于不同类型的 PST。

鉴于潮流控制设备控制器的控制参数会随着系统不同运行工况和故障发生变化,后续继续开展各种潮流控制设备对原有保护系统的影响,进而提出新的保护配置方法。

#### 4 灵活潮流控制装置的应用场景

潮流控制装置结构紧凑、占地面积小,可灵活调节潮流分布,解决局部线路或断面重载问题,提升电网供电能力。对于网架结构相对固定、潮流分布存在不均、输电走廊资源稀缺的电网,潮流控制装置能够消除关键断面输电瓶颈,有效挖掘电网输电、供电潜能,在我国电网的可行应用场景可分为以下几类:

(1) 均衡主变负载分布,提升分区电网供电能力。受制于分区电网内部电源与负荷分布情况,部分分区存在主变负载严重不均,“短板效应”限制了分区受电能力。通过关键通道加装 PST 可调节均衡主变负载,并在负荷增加过程中实现主变负载均匀增加,从而提升分区电网供电能力,如图 10 所示。

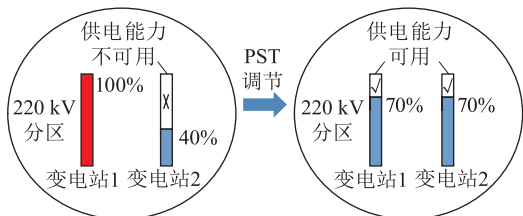


图 10 提升分区电网供电能力

Fig.10 Improve the power supply capacity of district grid

(2) 均衡线路潮流分布,提升关键断面输电能力。受制于供需分布及通道建设资源,江苏电网存在关键断面“卡脖子”现象,通道潮流不均进一步抑制了设备供电潜能,造成“1+1<2”情况,如主网过江断面、南京西环网 220 kV 受电断面等。可在重载线路上加装潮流控制装置,将部分潮流转移至轻载线路,实现平行线路之间的潮流均衡,进而提升关键断面输电能力,如图 11 所示。

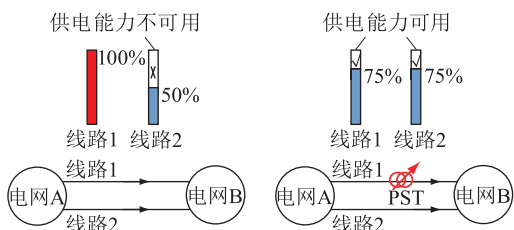


图 11 提升关键断面输电能力

Fig.11 Improve the transmission capacity of key sections

(3) 大规模新能源潮流疏散控制。“十四五”期间集中式、分布式光伏以及海上风电等大规模并网,其自身的强间歇性、随机性和波动性导致送出通道潮流波动性,新能源有功出力较大时部分输电通道存在  $N-1$  过载风险。可通过潮流控制装置解决有功潮流的疏散问题,同时挖掘现有输变电设备的供电潜能,如图 12 所示。

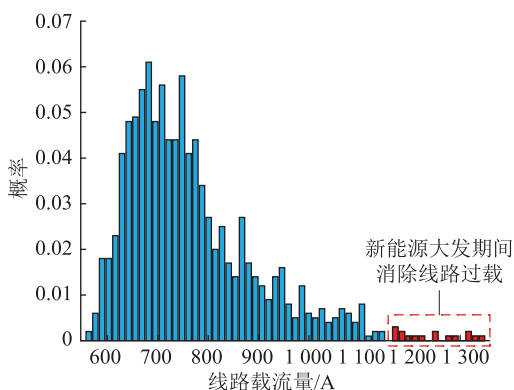


图 12 新能源送出通道潮流概率分布

Fig.12 Probability distribution of power flow in new energy transmission channel

(4) 实现 110 kV 电网合环运行,均衡 220 kV 主变负载。负荷和新能源逆向分布,相邻 220 kV 主变存在同时升压、降压的情况,新建通道、扩建主变等工程难以实施,主变间 110 kV 联络线加装 PST,可均衡主变负载,解决主变重轻载问题,提升新能源就地消纳能力,如图 13 所示。

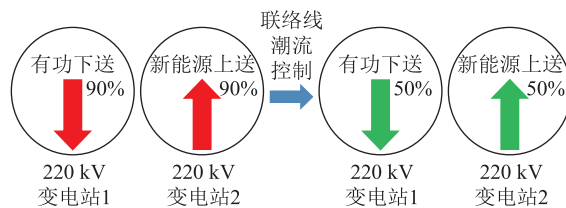


图 13 均衡 220 kV 主变负载

Fig.13 Balancing the load of 220 kV transformers

(5) 抑制系统振荡和提升电网运行稳定性。潮流控制装置除优化潮流分布、提升供电能力外,可等效连续、快速、大范围地改变线路阻抗,从而抑制系统振荡,有效提高电力系统稳定性。以 TCSC 为例,通过优化控制策略,可有效提升系统阻尼特性,抑制电网频率振荡。

#### 5 结语

随着电网规模增大、运行复杂度提高,未来对电网的灵活性、实用性要求也相应提高。UPFC、SSSC、TCSC 和 PST 作为潮流控制设备的典型代表,在电网系统中具有巨大发展前景。

总体而言,对于潮流控制装置的控制策略、故障保护和选址定容已经开展了不少研究,但随着潮流控制装置在电网中不断应用,潮流控制设备之间相互配合、协调控制等方面仍然存在着技术瓶颈。

未来须继续深入研究 UPFC、SSSC、TCSC 和 PST,不仅在潮流控制设备控制算法、选址定容等自身的技术方面进行突破,还要兼顾设备间、设备与其他电气元件间的协调控制问题,使不同元件之间能够协调配合,提升电力系统的稳定性。

### 致 谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“基于晶闸管的可控移相器设计及应用关键技术研究”(J2020148)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 孙国强,张格,卫志农,等. 基于深度学习的含统一潮流控制器的电力系统快速安全校正[J]. 电力系统自动化,2020,44(19):119-127.  
SUN Guoqiang,ZHANG Ke,WEI Zhinong,et al. Deep learning based fast security correction of power system with unified power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(19):119-127.
- [2] 韩建,李幸,罗德荣,等. 基于双级矩阵变换器的统一潮流控制器并联侧无功扩展[J]. 电工技术学报,2020,35(7):1498-1508.  
HAN Jian,LI Xing,LUO Derong,et al. Extending thereactive power range of shunt side for unified power flow controllers based on indirect matrix converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(7):1498-1508.
- [3] 吴奕,顾乔根,崔玉,等. UPFC 系统的变压器差动保护分析[J]. 电力工程技术,2021,40(1):99-106.  
WU Yi,GU Qiaogen,CUI Yu,et al. Transformer differential protection in UPFC system[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(1):99-106.
- [4] 黄涛,赵青春,谢华,等. UPFC 接入对线路变化量方向元件的影响[J]. 电力工程技术,2020,39(5):85-91.  
HUANG Tao,ZHAO Qingchun,XIE Hua,et al. Impact of UPFC on transmission line variation direction elements[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(5):85-91.
- [5] 孙蓉,朱梓荣,卫志农,等. 计及 UPFC 的电力系统多阶段多目标无功优化算法[J]. 电力工程技术,2020,39(1):76-85.  
SUN Rong,ZHU Zirong,WEI Zhinong,et al. Multi-objective and multi-stage reactive power optimization algorithm for power system considering UPFC[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(1):76-85.
- [6] 高本锋,王飞跃,于弘洋,等. 应用静止同步串联补偿器抑制风电次同步振荡的方法[J]. 电工技术学报,2020,35(6):1346-1356.  
GAO Benfeng,WANG Feiyue,YU Hongyang,et al. The suppression method of wind power sub-synchronous oscillation using static synchronous series compensator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(6):1346-1356.
- [7] 赵静波,卫志农,朱梓荣,等. 计及设备动作次数约束与 UPFC 的无功优化算法[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):179-187.  
ZHAO Jingbo,WEI Zhinong,ZHU Zirong,et al. Reactive power optimization algorithm considering device action times and UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(12):179-187.
- [8] RASHAD A,KAMEL S,JURADO F,et al. Optimal design of SSSC and crowbar parameters for performance enhancement of Egyptian Zafrana wind farm[J]. Electrical Engineering,2022,104(3):1441-1457.
- [9] 睦仁杰,薛峰,周野,等. 提高电力系统暂态稳定性的 TCSC 控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(9):64-69.  
SUI Renjie,XUE Feng,ZHOU Ye,et al. TCSC control strategy for enhancing the transient stability of power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2018,30(9):64-69.
- [10] 罗远翔,陈秀华,刘铖. 基于能量函数及 PID 算法的 TCSC 控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(10):37-42.  
LUO Yuanxiang,CHEN Xiuhua,LIU Cheng. TCSC control strategy based on energy function and PID algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(10):37-42.
- [11] 张宇宇,张格,李群,等. 基于改进 MCCIPM 的含 TCPST 电力系统最优潮流计算[J]. 电力工程技术,2021,40(5):144-150.  
ZHANG Ningyu,ZHANG Ke,LI Qun,et al. Optimal power flow calculation of power system containing TCPST based on improved MCCIPM[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(5):144-150.
- [12] 郑涛,汤哲,张滋行,等. 统一潮流控制器对继电保护的影响及对策研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(15):171-178.  
ZHENG Tao,TANG Zhe,ZHANG Zihang,et al. Review of the influence of unified power flow controller on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control,2019,47(15):171-178.
- [13] 李娟,李方媛,王鹏,等. 限流式 SSSC 提高 DFIG 型风火打捆系统暂态稳定分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(5):68-76.  
LI Juan,LI Fangyuan,WANG Peng,et al. Analysis of improving transient stability of DFIG-type wind-thermal binding system by current-limiting SSSC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(5):68-76.
- [14] 李浩,方鑫,肖洒. 静止同步串联补偿器在电力系统中的应用[J]. 电气开关,2017,55(1):66-68,72.  
LI Hao,FANG Xin,XIAO Sa. Application of static synchronous series compensation in power systems[J]. Electric Switchgear,2017,55(1):66-68,72.
- [15] 韩平平,王希,王欢,等. 基于移相变压器的直驱风机次同步振荡抑制[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(4):



- 126-134.
- HAN Pingping, WANG Xi, WANG Huan, et al. Subsynchronous oscillation mitigation of permanent magnet synchronous generator based on phase shifting transformer[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(4): 126-134.
- [16] 杨旗, 班国邦, 谢百明, 等. 移相变压器应用于输电线路在线融冰方法与仿真研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3349-3355.
- YANG Qi, BAN Guobang, XIE Baiming, et al. Deicing method and simulation of phase-shifting transformer for on-load transmission lines [J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3349-3355.
- [17] OKON T, WILKOSZ K. Phase shifter models for steady state analysis[C]//17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague, Czech Republic. IEEE, 2016: 1-6.
- [18] 候承昊, 戴朝波, 孙莹, 等. 可控移相器研究现状及其发展前景[J]. 智能电网, 2014, 2(1): 18-21.
- HOU Chenghao, DAI Chaobo, SUN Ying, et al. Status quo and feature of thyristor controlled phase shifting transformer [J]. Smart Grid, 2014, 2(1): 18-21.
- [19] 李璇, 刘国静, 朱磊, 等. 含 UPFC 南京西环电网系统可靠性评估研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 26-31.
- LI Hu, LIU Guojing, ZHU Lei, et al. Study on system reliability evaluation of Nanjing west loop power network with UPFC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 26-31.
- [20] 杨林, 蔡晖, 汪惟源, 等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的工程应用[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 47-53.
- YANG Lin, CAI Hui, WANG Weiyan, et al. Application of 500 kV UPFC in Suzhou southern power grid [J]. Electric Power, 2018, 51(2): 47-53.
- [21] 王楠, 兰春虎, 张来, 等. 天津静止同步串联补偿器示范工程设计关键技术研究[J]. 科技创新导报, 2020, 17(4): 28-31.
- WANG Nan, LAN Chunhu, ZHANG Lai, et al. Research on key technologies of Tianjin static synchronous series compensator demonstration project design[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(4): 28-31.
- [22] 沈涛. 移相变压器在电力系统中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- SHEN Tao. Application research of phase shifting transformer in power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [23] 万延康, 韩松, 杨涛. 移相变压器研究与应用[J]. 贵州电力技术, 2017, 20(3): 88-92, 25.
- WAN Yankang, HAN Song, YANG Tao. Research and application of phase shifting transformer[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2017, 20(3): 88-92, 25.
- [24] 窦飞. 统一潮流控制器在南京 220 kV 西环网的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- DOU Fei. Application of UPFC in Nanjing 220 kV west loop power network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [25] 谢伟, 崔勇, 冯煜尧, 等. 上海电网 220 kV 统一潮流控制装置示范工程应用效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 136-142.
- XIE Wei, CUI Yong, FENG Yuyao, et al. Analysis of application effect of 220 kV UPFC demonstration project in Shanghai grid [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 136-142.
- [26] 甄宏宁. 统一潮流控制器在南京电网的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHEN Hongning. Study on the unified power-flow controller in Nanjing power network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [27] 刘纲, 蔡晖, 祁万春, 等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6): 119-124.
- LIU Gang, CAI Hui, QI Wanchun, et al. Study on application of 500 kV unified power flow controller at southern power system of Suzhou [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 119-124.
- [28] SINGH P, SENROY N, TIWARI R. Guaranteed convergence embedded system for SSSC and IPFC [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2725-2728.
- [29] 吴熙, 王瑞, 陶加贵, 等. 线间潮流控制器建模及潮流优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1377-1385, 1544.
- WU Xi, WANG Rui, TAO Jiagui, et al. Modeling of interline power flow controller and power flow optimization method considering interline power flow controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1377-1385, 1544.
- [30] 吴熙, 王亮, 陈曦, 等. UPFC 与 IPFC 提升系统输电能力比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 128-134.
- WU Xi, WANG Liang, CHEN Xi, et al. Comparative research on UPFC and IPFC enhancing transmission capability of a power system [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 128-134.
- [31] 陈晨, 杜文娟, 王海风. 风电场接入引发电力系统次同步振荡机理综述[J]. 南方电网技术, 2018, 12(1): 84-93.
- CHEN Chen, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Review on mechanism of sub-synchronous oscillations caused by grid-connected wind farms in power systems [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1): 84-93.
- [32] 蒋晨阳. 多个 SSSC 元件交互影响分析与协调控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- JIANG Chenyang. The interaction analysis and coordination control of multiple SSSC components [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [33] 宋洁莹, 冯献强, 崔福博, 等. MMC-UPFC 动态建模及内部特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 67-75.
- SONG Jieying, FENG Xianqiang, CUI Fubo, et al. Dynamic-modeling and internal characteristic simulation research of

- MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 67-75.
- [34] 费骏韬, 罗珊珊. MMC-UPFC 交叉解耦控制策略研究综述[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1): 45-48.
- FEI Juntao, LUO Shanshan. Review of MMC-UPFC cross decoupling control strategy[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1): 45-48.
- [35] 朱五军. 基于多电平技术的统一潮流控制器研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2017.
- ZHU Wujun. Research on unified power flow controller based on multi-level technology[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2017.
- [36] 赵坚鹏, 宋洁莹, 许建中, 等. 静止同步串联补偿器的优化选址定容方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1941-1948.
- ZHAO Jianpeng, SONG Jieying, XU Jianzhong, et al. Locating and sizing optimization of static synchronous series compensator[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1941-1948.
- [37] 庄海军, 任晓菲. SSSC 的选址及网损优化研究[J]. 黑龙江电力, 2015, 37(3): 206-210.
- ZHUANG Haijun, REN Xiaofei. Research on the location of SSSC and optimization of network loss[J]. Heilongjiang Electric Power, 2015, 37(3): 206-210.
- [38] 赵渊, 杨晓嵩, 谢开贵. UPFC 对电网可靠性的灵敏度分析及优化配置[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 55-60.
- ZHAO Yuan, YANG Xiaosong, XIE Kaigui. Parameter sensitivity and optimal allocation of UPFCs in bulk power systems reliability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 55-60.
- [39] 李娟, 费洋. 基于改进多目标万有引力算法的 UPFC 选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(3): 76-83.
- LI Juan, FEI Yang. Site selection and determination of capacity for UPFC based on improved multi-objective gravitational search algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(3): 76-83.
- [40] PATERNI P, VITET S, BENA M, et al. Optimal location of phase shifters in the French network by genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 37-42.
- [41] 王辉, 王耀南, 许维东. 基于模糊自整定 PI 控制的 SSSC 潮流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 65-69.
- WANG Hui, WANG Yaonan, XU Weidong. Investigation of a power flow controller of SSSC based on self-tuning PI controller with fuzzy logic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 65-69.
- [42] 张爱国, 韩军锋, 蒋程. 基于神经网络自适应 PI 控制的 SSSC 潮流控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 15-19, 24.
- ZHANG Aiguo, HAN Junfeng, JIANG Cheng. Power flow control of SSSC based on adaptive PI controller with neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 15-19, 24.
- [43] 侯丽, 刘琦, 鲁宝春. UPFC 模糊控制器优化设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(8): 49-53.
- HOU Li, LIU Qi, LU Baochun. Fuzzy controller optimized design for UPFC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(8): 49-53.
- [44] 张志辉, 张健. 基于模糊滑模变结构控制的 UPFC 控制策略的研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 281-285, 291.
- ZHANG Zhihui, ZHANG Jian. Research on UPFC control strategy based on fuzzy variable structure[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 38(5): 281-285, 291.
- [45] NAVABI R, ETEMAD R, SHAYANFAR H A. Self tuning fuzzy PI controller for UPFC to improve power system stability optimized by ant colony method[C]//The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. IEEE, 2010.
- [46] WANG H F. Interactions and multivariable design of multiple control functions of a unified power flow controller[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002, 24(7): 591-600.
- [47] 任必兴, 杜文娟, 王海风. UPFC 与系统的强动态交互对机电振荡模式的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2520-2534.
- REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Impact of strong dynamic interaction between UPFC and system on electromechanical oscillation mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2520-2534.
- [48] 张巍, 向铁元, 陈红坤, 等. 基于嵌套多目标粒子群算法的多类型柔性交流输电系统优化配置[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1590-1598.
- ZHANG Wei, XIANG Tiejue, CHEN Hongkun, et al. Multi-type flexible AC transmission system optimization placement based on nesting multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1590-1598.
- [49] 刘隽, 李兴源, 姚大伟, 等. 静止同步串联补偿器与静止无功补偿器的相互作用分析与协调控制[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 20-25.
- LIU Jun, LI Xingyuan, YAO Dawei, et al. Analysis on interaction between static synchronous series compensator and static var compensator and their coordination control[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 20-25.
- [50] 刘青, 王增平. 基于 Pareto 协同进化算法的多个 FACTS 元件协调控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 79-81, 96.
- LIU Qing, WANG Zengping. Coordinative control of multiple FACTS controllers based on Pareto co-evolution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 79-81, 96.
- [51] 李婷, 吴敏, 何勇. 计及广域测量系统时滞影响的灵活交流输电系统阻尼控制器多目标设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 227-234.
- LI Ting, WU Min, HE Yong. Multi-objective design of FACTS

- damping controller based on WAMS with signal transmission delay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8):227-234.
- [52] 刘青,马朋,邹家平. 基于 WAMS 的 UPFC 装置的附加控制器设计[J]. 华北电力技术, 2015(2):13-18.  
LIU Qing, MA Peng, ZOU Jiaping. Coordinated control of multi-UPFC based on WAMS[J]. North China Electric Power, 2015(2):13-18.
- [53] KAWABE K, YOKOYAMA A. Stability enhancement by multiple unified power flow controllers using wide-area information in the multi-machine power system[C]//International Conference on Power System Technology. IEEE, 2010.
- [54] 马朋. 基于 WAMS 的 UPFC 元件的负交互影响分析及协调控制[D]. 北京:华北电力大学, 2016.  
MA Peng. Negative interaction analysis and coordinated control of UPFC based on WAMS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [55] 郑涛,吴丹,宋洁莹. 基于 MMC 的统一潮流控制器交流侧故障特性及保护方案[J]. 电网技术, 2015, 39(12):3570-3577.  
ZHENG Tao, WU Dan, SONG Jieying. The AC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on MMC[J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3570-3577.
- [56] 陈峰,江道灼,郭易木,等. 限流式 UPFC 保护电路的设计与验证[J]. 电网技术, 2015, 39(7):2040-2045.  
CHEN Feng, JIANG Daozhuo, GUO Yimu, et al. Design and verification of protection circuit for UPFC-FCL[J]. Power System Technology, 2015, 39(7):2040-2045.
- [57] 方雨康,于弘洋,陆振纲,等. 一种接入 SSSC 的交流线路自适应距离保护方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(3):50-58.  
FANG Yukang, YU Hongyang, LU Zhengang, et al. Adaptive-distance protection scheme in presence of SSSC[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44(3):50-58.
- [58] 常彦彦. SSSC 串补线路的故障位置识别及保护新原理的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2011.  
CHANG Yanyan. Fault position identification and new principle of protection for series compensated transmission lines with SSSC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [59] 侯炜,邵铃敏,段胜朋,等. 多分支移相变压器差动保护技术研究及应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10):205-209.  
HOU Wei, SHAO Lingmin, DUAN Shengpeng, et al. Research and application of differential protection for multi-branch phase-shifting transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):205-209.

作者简介:



李群

李群(1967),男,博士,研究员级高级工程师,从事柔性输电技术、FACTS 技术在电力系统中的应用、新能源并网技术相关工作(E-mail: Qun\_li@sina.com);

张宁宇(1985),男,博士,高级工程师,从事柔性输电技术、海上风电并网与控制技术相关工作;

王新宝(1981),男,硕士,工程师,从事柔性交流输电技术、海上风电并网与控制技术相关工作。

## Review on application of flexible power flow control technology

LI Qun<sup>1</sup>, ZHANG Ningyu<sup>1</sup>, WANG Xinbao<sup>2</sup>, DING Fengfeng<sup>2</sup>, FU Junbo<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Unified power flow controller (UPFC), static synchronous series compensator (SSSC), thyristor controlled series compensation (TCSC) and phase shifter (PST) can be able to adjust line parameters and flexibly control power flow. They have been applied in domestic and foreign power grids, and have played an important role in balancing power flow in transmission channels and improving power supply capacity. The theoretical research and engineering practice of UPFC, SSSC, TCSC and PST are summarized. Firstly, the basic structure and power flow control principle of four kinds of power flow control devices are analyzed, and projections of power flow control devices are introduced. Then, the key technologies of power flow control devices are summarized from five aspects: topology, converter technology, location and capacity, control strategy and fault protection. Finally, the typical application scenarios of power flow control devices in the future power grid are prospected, and the research direction of power flow control technology in the future is analyzed.

**Keywords:** power flow control; unified power flow controller (UPFC); static synchronous series compensator (SSSC); thyristor controlled series compensation (TCSC); phase shifter (PST); power electronic technology

(编辑 方晶)