

DOI: 10.7667/PSPC170565

# 上海电网 220 kV 统一潮流控制装置示范工程应用效果分析

谢伟<sup>1</sup>, 崔勇<sup>1</sup>, 冯煜尧<sup>1</sup>, 宋洁莹<sup>2</sup>, 余颖辉<sup>1</sup>, 鲍伟<sup>1</sup>, 郭强<sup>1</sup>

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 结合上海特大城市电网特征和实际运行需求, 分析了上海 220 kV 电网加装统一潮流控制器装置(UPFC)的必要性。确定了 UPFC 示范工程合理的选址方案, 提出了 220 kV 蕴藻浜站 UPFC 示范工程的电气主接线、主设备参数以及控制策略。基于实时闭环仿真平台研究了加装 UPFC 对上海电网的影响。通过仿真验证了 UPFC 示范工程在提升电网传输能力、改善电网电压稳定性、实现分区无功就地平衡等方面的多重应用效果。

**关键词:** 上海电网; 统一潮流控制装置; 选址方案; 应用效果; 潮流调节; 动态无功支撑

## Analysis of application effect of 220 kV UPFC demonstration project in Shanghai Grid

XIE Wei<sup>1</sup>, CUI Yong<sup>1</sup>, FENG Yuyao<sup>1</sup>, SONG Jieying<sup>2</sup>, YU Yinghui<sup>1</sup>, BAO Wei<sup>1</sup>, GUO Qiang<sup>1</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute, SMEPC, Shanghai 200437, China;

2. Global Energy Interconnection Research Institute Co. Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** The feasibility study of UPFC application in 220 kV Shanghai Grid is conducted based on characteristic and practical operation of Shanghai megacity grid. The reasonable location scheme of the UPFC demonstration project is determined, and main electrical connection, parameters of the main equipment and control strategy of 220 kV Yunzaobang station UPFC demonstration project are proposed. Based on the real time close-loop simulation platform, the influence of installing UPFC on Shanghai power grid is studied. The simulation results show that the demonstration project of UPFC has multiple application effects in terms of enhancement of power grid transfer capability, improvement of grid voltage stability performance and contribution to local balance of partitioned reactive power.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050401).

**Key words:** Shanghai grid; unified power flow controller; location scheme; application effect; power flow regulation; dynamic reactive power support

## 0 引言

统一潮流控制装置(Unified Power Flow Controller, UPFC)是目前为止功能最全面、控制范围最广且特性最优越的柔性交流输电装置, 代表了目前柔性交流输电技术的最高水平<sup>[1-2]</sup>。UPFC 通过调节串联侧和并联侧换流器输出电压的幅值和相角, 可以独立或同时对受控母线的电压幅值、受控线路的有功和无功功率进行快速控制<sup>[3-4]</sup>, 为改善电网的潮流分布、提高线路输电能力, 提供了新思路和新技术, 同时还具有动态无功支撑、无功电压调节, 提高电压稳定性以及阻尼控制的作用<sup>[5]</sup>。

目前国外已有 3 座投入实际运行的 UPFC 工程,

包括美国 INEZ 变电站的 UPFC 工程<sup>[6]</sup>, 纽约州的 Marcy 345 kV 变电站的 CSC 工程<sup>[7]</sup>以及韩国 Kangjin 变电站的 UPFC 工程<sup>[8]</sup>, 国内已经投运了南京 220 kV 西环网 UPFC 工程和苏南 500 kV UPFC 工程<sup>[9-11]</sup>。这些工程主要为了解决电网中潮流输送能力不足、无功支撑薄弱等问题, 在实际运行中均发挥了良好的应用效果。

上海电网结合运行需求以及国家 863 计划任务实施, 开展了 UPFC 在特大城市中心城区电网的示范工程应用。本文结合上海电网实际运行需求, 首先分析上海电网加装 UPFC 的必要性, 然后提出 UPFC 示范工程选址原则和选址流程, 研究确定 UPFC 示范工程合理的选址方案, 在介绍 UPFC 示范工程电气主接线和控制策略的基础上, 分别从提升断面输送能力、提高电网电压稳定性、平衡分区

电网无功等方面分析 UPFC 示范工程对上海电网的多重应用效果。

## 1 上海电网 UPFC 示范工程选址研究

### 1.1 上海电网加装 UPFC 需求分析

上海电网作为我国最大的城市电网,负荷密度高,但线路走廊资源匮乏,新建输电通道的难度极其巨大,局部断面潮流重载,同时由于部分输电断面电缆架空线混合,线路参数不匹配,导致断面潮流输送能力受到制约。

上海电网通过 4 回直流从西南输入大量水电清洁能源,占上海电网最高用电负荷的近 5 成。高比例外来电导致上海电网本地机组开机需求减少,同时叠加调峰因素,大量本地机组深度调峰甚至关停,使得受端电网动态无功支撑不足,电压稳定性问题突出<sup>[12]</sup>。

上海城市电网负荷高峰时段低电压问题和低谷时段高电压问题并存,无功调节能力差,电压控制困难。在负荷高峰时段部分地区容性无功缺乏导致电压水平较低,而在负荷低谷时段,无功消耗降低加上电缆线路占比很高,无功充电功率大,导致感性无功平衡困难,电网电压水平较高<sup>[13]</sup>。

综上所述,UPFC 所具备的提升断面输送能力、提高电网电压稳定性、平衡分区电网无功等主要功能在上海电网都有应用的场景,加装 UPFC 对于统筹解决上海电网当前存在的几个突出问题发挥了重要作用,因此上海电网对加装 UPFC 的需求较为迫切,具有建设的必要性。

### 1.2 UPFC 示范工程选址研究

在进行示范工程选址时,首先采用排除法从上海电网 220 kV 变电站中筛选出 UPFC 示范工程安装地址的备选方案,然后对几种备选方案进行综合比较,从而确定相对较优的安装地址。

考虑到上海电网 2013 年后投产的 220 kV 变电站基本均采用 GIS 设备,户内紧凑设计,较难腾出空地来安装 UPFC 装置,因此,只能结合老站改造计划作为 UPFC 的安装地点。根据上海电网老站改造计划,将蕴藻浜、长春、古美三个变电站作为 UPFC 示范工程安装地点的备选方案。

通过分析表明,在蕴藻浜~闸北断面上装设 UPFC,可通过潮流调节有效提高该断面的输送能力,同时还可以提高该地区电压控制水平,提高电压稳定性。而在古美和长春站安装 UPFC 将主要作为动态无功电源使用,用于提高泗泾分区的电压控制水平和电压稳定性,无法发挥 UPFC 的潮流调节作用。

因此综合站址、占地、作用等多方面比较,确定 220 kV 蕴藻浜站作为 UPFC 示范工程安装地址。

## 2 上海电网 UPFC 示范工程主接线及控制策略

### 2.1 UPFC 示范工程主接线

考虑到闸北~蕴藻浜 3 回输电线路中闸蕴 2258 线路阻抗与其他两回闸蕴 2210 和闸蕴 2205 线路存在差异,从而导致断面潮流分布不均。为合理控制线路潮流,提高输电断面输送能力,将 UPFC 装置接入闸蕴 2258 线路。UPFC 接入地点及周边电网结构图如图 1 所示。

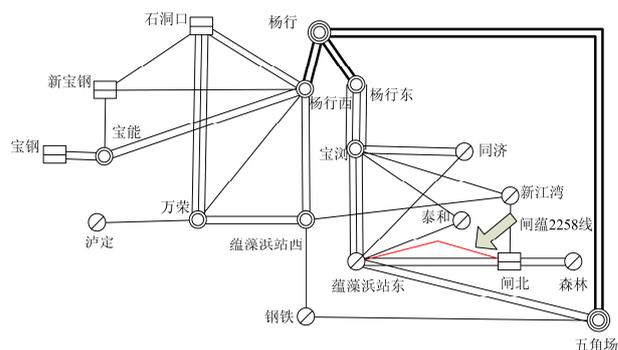


图 1 UPFC 接入地点及周边电网结构图

Fig. 1 Configuration of grid within the vicinity of UPFC

本工程 UPFC 电气主接线如图 2 所示。根据系统运行需要,UPFC 交流侧采用一并一串方式接入 220 kV 系统,通过隔离开关灵活切换,可实现 UPFC、单 STATCOM1、单 STATCOM2、SSSC 和双 STATCOM 四种运行模式。对应电气主接线,装置在不同运行模式下对应的开关、断路器状态如表 1 所示。

表 1 不同运行模式下 UPFC 装置运行开关位置

Table 1 Breaker status of UPFC device under different modes

	STATCOM1	STATCOM2	双 STATCOM	UPFC	SSSC
QS01	合	合	合	合	分
QS02	合	合	合	合	分
QS11	分	分	分	合	合
QS12	分	分	分	合	合
QS13	合	合	合	分	分
QS14	合	合	合	合	合
QS21	合	合	合	合	分
QS31	分	分	分	分	合
QS41/	分	分	分	合	分
QS42					
QF01	合	合	合	合	分
QF11	分	分	分	分	分
QF12	合	合	合	合	合
QF21	合	合	合	合	分
QF22	合	合	合	合	分
QF23	合	分	合	合	分
QF31	分	分	分	合	合
QF32	分	分	分	分	分
QF33	分	合	合	分	分

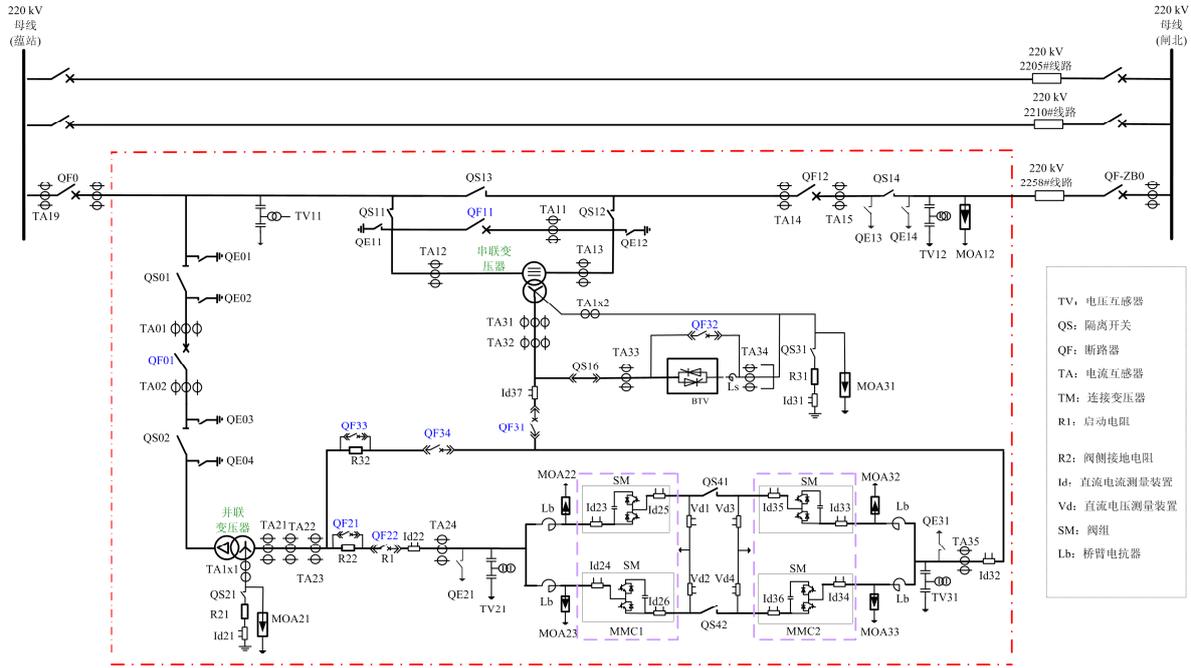


图 2 UPFC 示范工程电气主接线

Fig. 2 Main electrical wiring of UPFC demonstration project

UPFC 装置的主要设备包括串联变压器、并联变压器、换流阀、桥臂电抗器、晶闸管旁路开关、以及断路器、隔离开关等。UPFC 串联变容量为 50 MVA，采用户外三相三绕组，油浸式无载调压变压器，联接组别为 III, yn0d11，阻抗电压为 12%，冷却方式为自然油循环自冷；并联变容量 100 MVA，采用户外三相三绕组，油浸式无载调压变压器，联接组别为 Y, yn0d11(阀侧中性点经电阻接地)，阻抗电压为 10%，冷却方式为自然油循环自冷；模块化多电平换流器容量为±50 MVA，额定直流电压为

±20.8 kV，额定交流线电压为 19.2 kV，额定交流电流为 752 A，桥臂额定电流有效值为 900 A，桥臂子模块梳理为 26+2 个，IGBT 的参数为 3 300 V/1 500 A；桥臂电抗器为干式，电感值为 7 mH；晶闸管旁路开关的短时故障耐流能力为 9.94 kA/100 ms<sup>[14]</sup>。

### 2.2 UPFC 示范工程控制策略

UPFC 交流母线电压控制策略如图 3 所示，采用换流器交流无功控制以及直流电压控制，来实现交流母线电压控制功能。

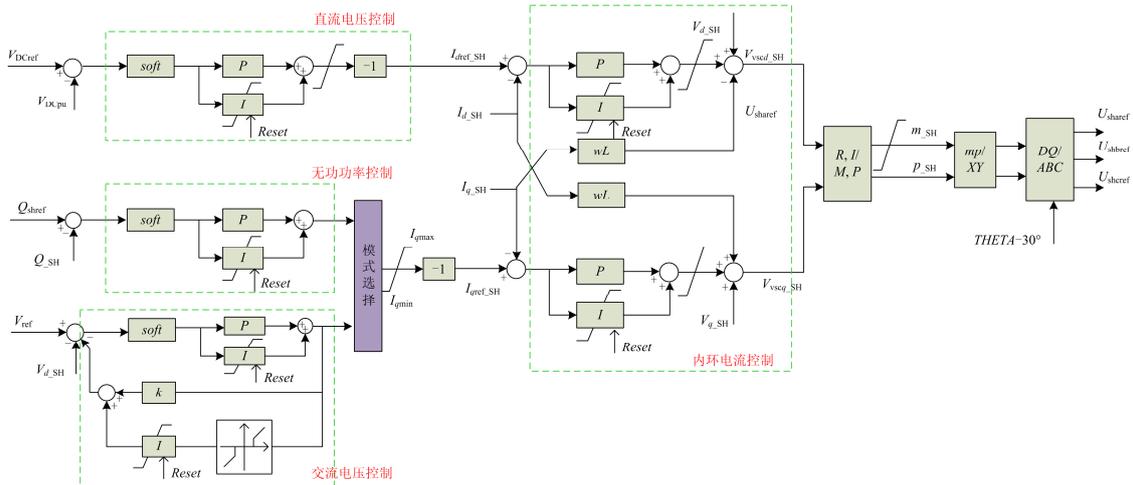


图 3 交流母线电压控制策略

Fig. 3 Control strategy of AC bus voltage

UPFC 输电线路潮流控制策略如图 4 所示, 采用输电线路有功功率、无功功率解耦控制方式, 实

现对线路有功和无功的独立控制, 同时具备开环注入电压控制功能。

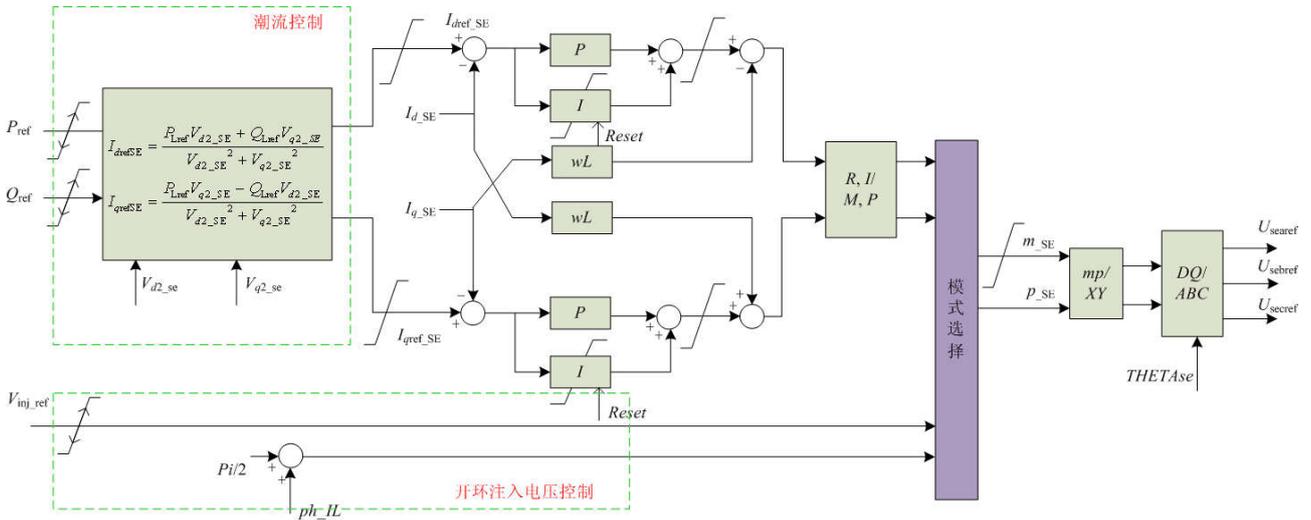


图 4 输电线路潮流控制策略

Fig. 4 Control strategy of transmission line power flow

UPFC 示范工程控制系统具备直流电压控制、交流母线电压控制、并联无功功率控制、线路潮流定制控制、断面潮流均衡控制、线路潮流限额控制等功能<sup>[15-17]</sup>。

UPFC 并联侧换流器除了维持直流母线电压稳定外, 主要有两种控制功能:

(1) 并联无功功率控制功能

依据本地或调度中心的指令, 向系统吸收或发出指定的无功功率, 单 STATCOM 和 UPFC 模式下无功功率最大调节范围为-50 Mvar~+50 Mvar, 双 STATCOM 模式下无功功率最大调节范围为-100 Mvar~+100 Mvar。

(2) 交流母线电压控制功能

依据蕴藻浜站 220 kV 交流母线电压的变化情况, 当母线电压超过一定范围时吸收或发出无功功率, 对交流母线电压进行控制。

串联侧换流器通过串联注入电压直接或间接影响所在线路潮流, 其控制功能主要包括:

(1) 线路潮流定制控制功能

在其控制能力范围内, 将闸蕴 2258 线路的有功功率、无功功率控制到指定值。

(2) 断面潮流均衡控制功能

依据闸北~蕴藻浜断面 3 回线路的运行状态及载流能力, 控制闸蕴 2258 线路潮流, 使得断面各线路潮流负载率接近。

(3) 线路潮流限额控制功能

当闸蕴 2258 线路潮流不越限时, 串联运行的

换流阀执行零电压控制, 也就是对线路潮流不进行控制; 而当线路潮流越限时, 再对线路潮流进行限制使其不超过载流能力。

此外, UPFC 装置具有一定的故障穿越能力, 当外部交流系统发生故障导致交流母线电压跌落或发生畸变时, 在一定程度范围内 UPFC 装置可不退出运行<sup>[18]</sup>。

### 3 上海电网 UPFC 示范工程应用效果分析

以下分别从提升断面输送能力、提高电压稳定性、平衡分区电网无功等方面, 分析 UPFC 示范工程在上海电网的多重应用效果。

#### 3.1 提升断面输送能力效果分析

闸北~蕴藻浜断面由闸蕴 2258、2210、2205 等 3 回线路组成, 2258 线路为电缆线路, 载流能力为 310 MW, 其余两回线路为架空线电缆混合线路, 通过动态增容均已增容到 310 MW。但由于 3 回线路阻抗不匹配, 闸蕴 2258 线路阻抗相对较小, 导致断面潮流分布不均衡, 2258 线路潮流较重, 受制于 2210 线路 N-1 后 2258 线路过载, 断面的输送能力为 570 MW, 此时断面潮流分布如图 5 所示。

在闸蕴 2258 线加装 UPFC 装置后, 通过对 2258 线路潮流进行快速调节控制, 均衡断面潮流分布, 从而可提高断面输送能力到 620 MW, 也就是将两回线路的载流能力利用充足。加装 UPFC 后闸蕴 2210 线路 N-1 故障后潮流分布图如图 6 所示。

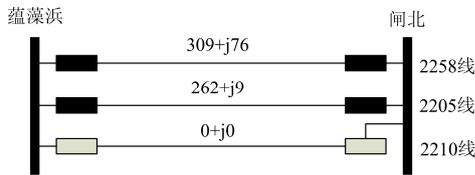


图 5 闸蕴 2210 线路 N-1 故障后潮流分布图(570 MW)  
Fig. 5 Power flow distribution of N-1 fault of Zhayun 2210 line (570 MW)

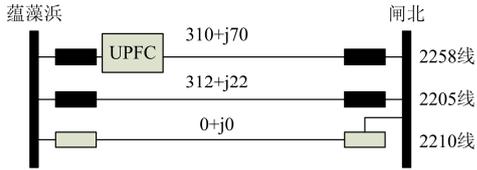


图 6 加装 UPFC 后闸蕴 2210 线路 N-1 故障后潮流分布图(620 MW)  
Fig. 6 Power flow distribution of N-1 fault of Zhayun 2210 line after installing UPFC (620 MW)

如果没有加装 UPFC 装置, 当断面潮流达到 620 MW 时发生 2210 N-1 故障后, 潮流分布如图 7 所示, 可以看出, 此时 2258 线路的潮流已经达到 330 MW, 超过其 310 MW 的载流能力。

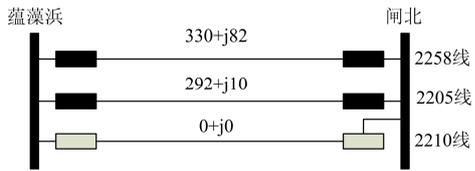


图 7 加装 UPFC 前闸蕴 2210 线路 N-1 故障后潮流分布图(620 MW)  
Fig. 7 Power flow distribution of N-1 fault of Zhayun 2210 line before installing UPFC (620 MW)

因此, 通过在闸蕴 2258 线路加装 UPFC 装置, 可将闸北~蕴藻浜断面输送能力由 570 MW 提高到 620 MW, 提升幅度为 50 MW。

### 3.2 提高电压稳定性效果分析

为消纳大规模西南水电, 上海电网长时间处于“强馈入弱开机”状态, 受端电压稳定问题凸显。经分析, 蕴藻浜站所在杨行分区是上海电网电压稳定薄弱点。UPFC 投运后, 通过快速发出无功功率, 可显著提高该地区电压稳定性。当 UPFC 无功指令由 0 阶跃至 50 Mvar 时, UPFC 无功响应波形如图 8 所示, 可以看出无功阶跃过程响应时间 20 ms, 响应较快, 超调量为 2%, 达到稳态后控制误差为 2%, 控制也较为平稳<sup>[19]</sup>。

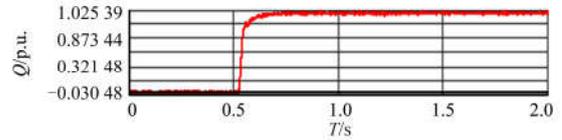


图 8 无功指令由 0 Mvar 阶跃至 50 Mvar 时 UPFC 响应波形  
Fig. 8 Step response of reactive power command from 0 Mvar to 50 Mvar

经电压稳定分析可知, 若在蕴藻浜站加装±50 Mvar 的 UPFC, 可提高严重故障下上海电网电压稳定裕度 500 MW, 约占上海电网总负荷的 1.6%, 如表 2 所示。

表 2 严重故障下上海电网电压稳定裕度

Table 2 Voltage stability margin of Shanghai grid under severe contingencies

运行方式	基础负荷/MW	UPFC 投运前	UPFC 投运后电
		电压稳定裕度/MW	压稳定裕度/MW
正常方式		7 070	7 110
杨行主变 N-1	31 000	6 310	6 460
徐行-杨行 N-2		5 210	5 410
复奉直流闭锁		4 200	4 490
复奉、宜华相继闭锁		3 520	4 020

### 3.3 平衡分区电网无功效果分析

上海电网为典型城市电网, 低谷负荷时段感性无功平衡困难。经无功平衡分析, 低谷时段闸北森林所在的杨行 220 kV 分区电网感性无功缺额达到 110 Mvar, 低谷时段杨行分区无功平衡如表 3 所示。

表 3 低谷时段杨行 220 kV 分区无功平衡情况

Table 3 Balancing of reactive power in 220 kV sectionized grid of Yanghang during valley-load period

无功电源/Mvar	220 kV 充电功率	211
	接入 220 kV 发电机无功出力	358
	220 kV 变电站低容无功	0
总计		569
无功负荷/Mvar	220 kV 变压器无功损耗	49
	220 kV 机组升压变无功损耗及厂用无功	73
	220 kV 线路无功损耗	15
	220 kV 低抗、高抗无功	140
	110 kV 及以下电网无功负荷	182
总计		459
感性无功缺额/Mvar		110

由于蕴藻浜站周边大部分为电缆线路,充电功率较大,UPFC 通过吸收无功功率,对电缆的充电功率进行感性补偿,在双 STATCOM 模式下最大可吸收 100 Mvar 无功功率,有利于实现无功就地平衡。此外在高峰负荷时段,电网容性无功缺乏时,UPFC 还可以发出无功功率进行容性补偿。

## 4 结论

(1) 上海电网对加装 UPFC 的需求较为迫切,UPFC 的主要功能在上海电网都有应用的场景,加装 UPFC 装置对于统筹解决上海电网当前存在的几个突出问题发挥了重要作用。

(2) 综合站址、占地、作用等多方面比较,确定 220 kV 蕴藻浜站作为 UPFC 示范工程的安装地点。考虑闸蕴 2258 线路阻抗较小导致断面潮流分布不均,因此将 UPFC 装置接入闸蕴 2258 线路。

(3) 通过在闸蕴 2258 线路加装 UPFC 装置,可将闸北~蕴藻浜断面输送能力由 570 MW 提高到 620 MW,提升幅度为 50 MW。可提高严重故障下上海电网电压稳定裕度 500 MW,约占上海电网总负荷的 1.6%。UPFC 通过吸收和发出无功功率,补偿杨行分区感性和容性无功缺额,可实现分区低谷时段和高峰时段无功就地平衡。

## 参考文献

- [1] 程汉湘. 柔性交流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] GYUGYI L. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1097.
- [3] 陈业飞, 李林川, 张芳, 等. 基于节点电流注入法的 UPFC 潮流控制新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 69-74.  
CHEN Yefei, LI Linchuan, ZHANG Fang, et al. Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current-injection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 69-74.
- [4] AMIR G, SEYED Y E, MORTEZA G, et al. Active power based distance protection scheme in the presence of series compensators [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2: 7.
- [5] 王海潜, 祁万春, 乔黎伟, 等. UPFC 三节点功率注入模型及其工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 145-151.  
WANG Haiqian, QI Wanchun, QIAO Liwei, et al. A three-bus power injection model of UPFC and its engineering application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 145-151.
- [6] SCHAUDER C, KERI A, EDRIS A, et al. AEP UPFC project: installation, commissioning and operation of the 160 MVA STATCOM (phase1)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1530-1535.
- [7] ARABI S, HAMADANIZADEH H, FARDANESH B. Convertible static compensator performance studies on the NY state transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 701-706.
- [8] KIM S Y, YOON J S, CHANG B H, et al. The operation experience of KEPCO UPFC[C] // 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005, 3: 2502-2505.
- [9] 蔡晖, 祁万春, 黄俊辉, 等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 73-78.  
CAI Hui, QI Wanchun, HUANG Junhui, et al. Application of UPFC in Nanjing Western Power System[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 73-78.
- [10] 陈刚, 李鹏, 袁宇波, 等. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127.  
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo, et al. Application of MMC-UPFC on Nanjing Western Grid and its harmonic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
- [11] 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. Application of UPFC in the 500 kV southern power grid of Suzhou [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 119-124.
- [12] 崔勇, 冯煜尧, 杨增辉, 等. “强馈入弱开机”下电网安全运行关键技术研究[J]. 上海节能, 2015, 34(6): 302-306.  
CUI Yong, FENG Yuyao, YANG Zenghui, et al. Research on key technologies of “high-level power import and scale-reduced online” off-grid safe operation[J]. Shanghai Energy Conservation, 2015, 34(6): 302-306.
- [13] 陈博, 殷婷, 黄一超, 等. 交直流区外来电背景下上海电网无功问题[J]. 电网与清洁能源, 2014, 31(4): 66-71.  
CHEN Bo, YIN Ting, HUANG Yichao, et al. Reactive

- power issues of Shanghai Power Grid under the background of AC-DC electric power from external regions[J]. *Power System and Clean Energy*, 2014, 31(4): 66-71.
- [14] 崔福博, 宋洁莹, 周飞, 等. 基于 MMC 的统一潮流控制器建模方法及其内部动态特性仿真分析[J]. *智能电网*, 2014, 2(12): 1-12.  
CUI Fubo, SONG Jieying, ZHOU Fei, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation analysis of UPFC based on MMC[J]. *Smart Grid*, 2014, 2(12): 1-12.
- [15] 宋洁莹, 周飞, 陆振纲, 等. 统一潮流控制器(UPFC)装置控制策略研究[R]. 北京: 国网智能电网研究院, 2015.
- [16] 张振华, 江道灼. 基于 MMC 拓扑的 UPFC 控制策略仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(3): 73-77.  
ZHANG Zhenhua, JIANG Daozhuo. Control strategy simulation of UPFC based on modular multilevel converters[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(3): 73-77.
- [17] 刘青, 马朋, 邹家平. UPFC 无功潮流控制引起负交互影响的解决方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(6): 76-81.  
LIU Qing, MA Peng, ZOU Jiaping. Solution to negative interaction caused by reactive power flow controlling of UPFC[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(6): 76-81.
- [18] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于 RTDS 仿真的 MMC\_UPFC 串联侧间接电流控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 56-62.  
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC\_UPFC indirect current control strategy based on RTDS[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 56-62.
- [19] 周飞, 陆振纲, 于弘洋, 等. 统一潮流控制器大功率在环仿真试验技术研究[J]. *电网技术*, 2016, 40(3): 861-867.  
ZHOU Fei, LU Zhengang, YU Hongyang, et al. Research on high power hardware-in-loop simulation and test technology of unified power flow controller[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(3): 861-867.

---

收稿日期: 2017-04-19; 修回日期: 2017-09-30

作者简介:

谢伟(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能电网配用电技术; E-mail: xiew@sh.sgcc.com.cn

崔勇(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统建模仿真与安全稳定分析; E-mail: yongzhe578@163.com

冯煜尧(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统建模仿真与安全稳定分析。

(编辑 张爱琴)