·工程应用·

# 统一潮流控制器在苏南 500 kV 电网中的应用

李 鹏，林金娇，孔祥平
（国网江苏省电力公司电力科学研究院，江苏 南京 211103）

**摘 要**：针对苏州南部 500 kV 电网供电能力提升、特高压直流功率消纳等问题，开展了统一潮流控制器（UPFC）在苏南 500 kV 电网应用的可行性研究，并给出了 UPFC 接入系统方案及拓扑结构，通过系统计算确定 UPFC 变压器及换流器容量。仿真计算验证了其对苏州南部 500 kV 电网潮流及电压调节作用，结果表明：苏南电网冬季大负荷及锦苏特高压直流小方式下，能消除梅里木渎断面 *N*-1 过载的问题；夏季锦苏直流大方式下发生双极闭锁时，通过提升地区电网供电能力，减小苏南地区切负荷量；通过 UPFC 无功电压控制，提供苏南地区电网电压恢复水平，一定程度上减少了锦苏直流发生换相失败。并给出了 UPFC 主设备关键参数的选择依据。

**关键词**：统一潮流控制器（UPFC）；换流器；串联变压器
**中图分类号**：TM77 **文献标志码**：A **文章编号**：2096-3203（2017）01-0020-05

随着电网供电能力提升难度增加，采用新技术发挥电网潜能需求愈发迫切，统一潮流控制器（unified power flow controller，UPFC）作为功能最强大的灵活交流输电装置，通过换流器控制能够对多个电气参数实现柔性控制，可以快速、灵活的调节电网的潮流分布，为破解廊道资源紧张等难题提供了重要解决手段[1,2]。

针对 220 kV 南京电网潮流缺乏灵活有效控制手段的问题，江苏省电力公司研制了国内外首套基于 MMC 技术的 UPFC 成套设备，并在南京 220 kV 西环网实现示范应用[3]。工程于 2015 年 12 月投入运行，多次将西环网关键断面潮流控制在稳定限额以下，为南京电网供电能力提升发挥了重要作用。结合苏州南部 500 kV 电网供电能力提升、特高压直流功率消纳等问题，江苏省电力公司开展了 UPFC 在苏南 500 kV 电网中应用的可行性分析，在借鉴南京 220 kV UPFC 示范工程经验的基础上制定了苏南 500 kV UPFC 工程技术方案，对 500 kV UPFC 拓扑结构、设备参数、容量确定及作用等进行分析。

## 1 苏南电网基本情况

### 1.1 苏南电网情况

苏州电网是江苏电网重要的负荷中心，2015 年苏州全市全社会最大负荷22 230 MW。苏州南部电网是苏州电网的重要组成部分，其负荷约占苏州电网的 45%，供电范围包括苏州市区及吴江地区，主要电源为锦苏特高压直流，并通过梅里—木渎、华能苏州—（石牌）—车坊及石牌—玉山—车坊 3 个 500 kV 输电通道受电。

### 1.2 工程必要性

特高压锦苏直流对苏州南部电网提供了有效的电力支撑，但由于该电源为水电直流，受季节性影响，冬季枯水期送电大幅减少（仅 20%左右）。冬季锦苏直流小方式下苏州南部电网 500 kV 交流受电通道潮流分布不均，梅里—木渎双回线潮流较重，限制了该地区电网的供电能力。另外，苏州南部 500 kV 电网负荷总量大，常规电源少，单一容量最大的电源锦苏直流不能向该地区提供无功支撑，动态无功电压支撑能力不足。

针对苏州南部电网存在问题，可考虑线路增容或新建线路等常规方案来解决，但投资巨大，且建设难度极大。借鉴南京 220 kV UPFC 示范工程的实施经验，经分析计算，在苏州南部 500 kV 电网安装 UPFC 可有效消除近期及远景冬季特高压直流小方式下的电力受进通道的过载问题，并为苏南地区提供动态无功电压支撑。加装 UPFC 方案与传统方案技术经济比较详见表 1。

**表 1 方案技术经济综合比较表**

| 项目 | UPFC 方案 | 传统方案（新增输电通道） |
|---|---|---|
| 直流小方式受进问题 | 能够解决 | 能够解决 |
| 工程实施可行性 | 木渎变具备装设 UPFC 的场地条件 | 线路路径途径苏州市区及无锡市区等发达地区，工程实施难度极大 |
| 动态无功电压支撑 | 能够减少直流换相失败概率 | 无 |
| 锦苏直流双极闭锁后的应急处理 | 限负荷量下降约 1000 MW | 无需限负荷 |

收稿日期：2016-10-31；修回日期：2016-11-28
基金项目：国家电网公司科技项目 500 kV 统一潮流控制器协调控制和保护配合技术研究

## 2　苏南 500 kV UPFC 接入系统方案

### 2.1　UPFC 接入电网方案

为解决苏州南部电网直流小方式下梅里—木渎双线的 $N-1$ 过载问题,保证充分消纳锦苏直流输送功率,提升苏南地区电网的动态无功/电压支撑能力,选择在紧邻 500 kV 木渎变装设 UPFC 装置,将梅里—木渎双线改接至 UPFC,实现 UPFC 对木渎—梅里双线的潮流控制功能,如图 1 所示。

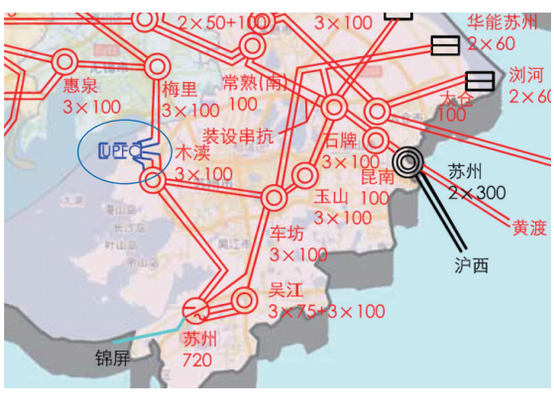



图 1　苏南 UPFC 接入方案

UPFC 串联变压器线路侧接入 500 kV 梅里—木渎双回线路中。串联变两端与 500 kV 梅里线路(一进一出)形成 4 回接线单元,分别设置进线断路器和旁路断路器。并联变压器线路侧采用并联接线方式接入木渎 500 kV 开关场内,采用变压器-线路单元接线,并设置独立断路器。因此,UPFC 站 500 kV 部分交流进线 2 回(梅里侧)、交流出线 3 回(木渎侧),串联变进线 4 回,并联变进线 1 回,共 10 个进出线单元,配置 5 台断路器,如图 2 所示。

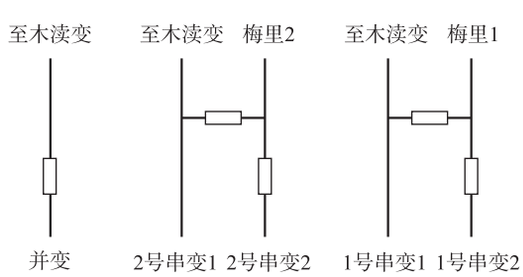



图 2　500 kV 侧接线

### 2.2　UPFC 系统结构

苏南 500 kVUPFC 工程系统方案原理如图 3 所示,串、并联侧 3 个换流器采用背靠背连接方式,串联侧 2 个换流器通过 2 个串联变压器接入木渎—梅里 500 kV 双回线路。并联侧 1 个换流器通过起动电阻接至并联变压器,再接入木渎变 500 kV 交流场。串联变压器阀侧和系统侧各配置 1 台旁路断路器,并在系统侧配置 1 台连接断路器,网侧和阀侧旁路开关均断开时,串联变压器串入线路,UPFC 投入运行;并联变压器通过专用断路器接入木渎变 500 kV 预留间隔。

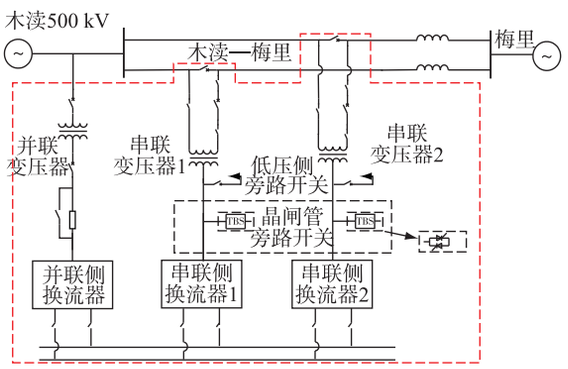



图 3　UPFC 系统方案原理

## 3　苏南 UPFC 的容量及作用

### 3.1　容量选择计算

#### 3.1.1　系统情况

2015 年,苏州南部电网最大负荷10 270 MW。“十三·五”期间,苏州南部地区负荷仍将平稳增长。预计苏州南部电网 2018 年最大负荷将达到 12 710 MW,夏季高峰负荷运行方式下锦苏直流丰水期送电6700 MW 时,苏州南部 500 kV 电网需要受进电力2980 MW;冬季高峰负荷运行方式下锦苏直流枯水期送电1340 MW 时,苏州南部 500 kV 电网需要受进电力7160 MW。预计苏州南部电网 2020 年最大负荷预计将达到13 500 MW。

考虑到苏州南部电网在直流小方式下梅里—木渎线路的 $N-1$ 过载问题,通过 UPFC 控制能够将梅里—木渎通道的潮流转移至裕度较大相邻通道,从而避免了 $N-1$ 后另一回线潮流越限,从而提高该地区的供电能力。

#### 3.1.2　容量计算

UPFC 串联变压器容量选取原则为:满足潮流控制需求时,网侧绕组注入线路的最大电压 $U_{T_max}$ 与阀侧绕组折算至线路侧的最大注入电压 $U_{VL_max}$ 中的较大值,以及线路额定电流 $I_{L_N}$,按下式确定串联变压器容量 $S_{NT}$:

$$S_{NT}=\sqrt{3}I_{L_N}\times\max(U_{T_max},U_{VL_max}) \quad (1)$$

根据系统对 UPFC 调节潮流的需求,可以计算出串联变压器网侧绕组注入线路的最大电压 $U_{T_max}$;而串联变压器阀侧最大电压则与其漏抗大小有关,在计算串联变压器阀侧折算至线路侧的最大注入电压 $U_{VL_max}$ 时,需要先估算一个串联变压器漏抗值,根据南京 UPFC 工程的经验,综合考虑流经串联变压器的短路电流限制需求及换流器容量选

择需求(改变线路有功功率时,换流器与线路交换的主要是无功功率,串变的漏抗越大,对换流器提升线路功率能力的影响越大),串联变压器的漏抗取为0.2 p.u.。

UPFC串联侧换流器容量选取原则为:满足潮流控制需求时,串联变压器阀侧折算至线路侧的最大注入电压、以及线路额定电流,按式(2)来确定串联换流器容量$S_{NV}$:

$$S_{NV} = \sqrt{3} I_{LI_N} \times U_{VL_max} \quad (2)$$

基于3.1中的潮流边界条件,考虑串联变压器漏抗为0.2 p.u.,梅里—木渎线路额定电流为4 kA,针对不同年份的各种方式,对系统进行仿真计算,UPFC所需的变压器以及阀侧容量计算结果详见表2。

**表2 各方式下UPFC变压器及阀侧容量**

| 系统条件 | 电网存在问题 | UPFC的主要作用 | 串联变两侧额定容量/(MV·A) |
|---|---|---|---|
| 2018年冬高 | 锦苏直流受进功率低,梅木双线不满足$N-1$ | 梅木双线$N-1$后,控制梅木另一回线不越限 | 线侧:166.0<br>阀侧:115.5 |
| 2020年冬高无特高压GIL | 锦苏直流受进功率低,梅木双线不满足$N-1$ | 梅木$N-1$后,控制梅木另一回线不越限 | 线侧:284.8<br>阀侧:234.3 |
| 2020年冬高,有特高压GIL | 锦苏直流受进功率低,梅木双线不满足$N-1$ | 梅木$N-1$后,控制梅木另一回线不越限 | 线侧:40.4<br>阀侧:40.6 |
| 远景年冬高(饱和负荷) | 锦苏直流受进功率低,梅木双线不满足$N-1$ | 梅木$N-1$后,控制梅木另一回线不越限 | 线侧:280.7<br>阀侧:230.5 |

由表2结果可见,上述各方式下UPFC所需最大串联变压器容量约为285 MV·A,对应最大注入线路电压为41.1 kV,换流器最大容量约为235 MV·A,对应最大阀侧折算至线路侧的电压为33.9 kV。考虑一定的裕度,取串联变压器额定容量为300 MV·A,额定电压为43.5 kV;串联侧换流器额定容量为250 MV·A。

UPFC在改变线路有功潮流时,串联换流器与并联换流器之间交换的有功功率较小,当改变线路的无功功率时,串联换流器与并联换流器之间交换的有功功率变化较大,经仿真估算,2个串联侧换流器和并联侧换流器交流的功率取为180 MW,即直流功率180 MW,可以满足系统控制需求。

由于并联侧换流器和2个串联侧换流器背靠背连接,3个换流器的直流电压等级相等,为了充分发挥UPFC并联换流器的无功补偿能力,可将并联侧换流器的容量取为与串联侧换流器一样,即为250 MV·A。

### 3.2 苏南UPFC的作用

#### 3.2.1 潮流控制作用

结合直流冬季小方式下的苏州南部500 kV电网潮流问题,对加装UPFC装置后电网潮流情况进行校核,计算结果分析见表3[4-7]。

**表3 各方式下UPFC提升电网供电能力**

| 编号 | 方式 | UPFC可提升供电能力 |
|---|---|---|
| 1 | 2018年夏季高峰方式,发生苏州直流双极闭锁 | 可减少切负荷约1000 MW |
| 2 | 2018年特高压GIL过江段线路未投运,冬季苏州直流小方式(20%出力) | 可减少切负荷约900 MW |
| 3 | 2020年特高压GIL过江段线路未投运,冬季苏州直流小方式(20%出力) | 可减少切负荷约1850 MW |
| 4 | 2020年特高压GIL过江段线路投运,冬季苏州直流小方式(20%出力) | 可减少切负荷约270 MW |
| 5 | 远景年饱和负荷,冬季苏州直流小方式(20%出力) | 可减少切负荷约1930 MW |

由计算结果可见:

(1) 2018年至2020年,考虑1000 kV泰州—苏州特高压GIL过江段线路未投运,在冬季苏州直流小方式下(20%出力),梅里—木渎线路发生$N-1$故障,另一回线路将超过其热稳极限。

(2) 2020年,冬季苏州直流小方式下(20%出力),若GIL过江线路投运,梅里—木渎线路发生$N-1$故障后,另一回线路潮流约3 020.2 MW,越限约2.38%,需要切除负荷约270 MW。

(3) 远景年饱和负荷且在冬季苏州直流小方式下(20%出力),梅里—木渎线路发生$N-1$故障后,另一回线路潮流约3447 MW,越限约16.85%,,需要限负荷约1930 MW。

(4) 2018年夏季高峰方式,若发生苏州直流双极闭锁,满发苏南地区所有机组后,还需限负荷2300 MW;加装UPFC后,可减少限负荷量约1000 MW,有效降低直流双极闭锁后的切负荷量。

(5) 建设UPFC后,可有效消除近期及远景冬季直流小方式下,梅里—木渎$N-1$故障后,另一回线路的过载问题。

#### 3.2.2 无功电压分析

在特高压直流落点的苏南500 kV电网运用UPFC,可同时发挥UPFC潮流控制和无功电压支撑两个方面的功能,有助于提高直流系统运行可靠性,增加电网供电能力及适应性[8-11]。

UPFC投运后,并联侧最大理论可输出动态无功出力范围为-250~250 MVAr,可对系统提供一定的动态无功电压支撑。通过仿真计算可知,UPFC投运后,若发生较严重故障,如梅里—木渎线路(梅里侧)、玉山—车坊线路(玉山侧)、茅山—斗山线路(茅山侧)发生三永故障,通过UPFC无功支撑,可使得苏州南部电网恢复电压提高约2~3 kV。

对投产年木渎变进行调相调压计算,结果表明:各运行方式下,木渎变及 UPFC 站 500 kV 母线运行电压在 502~508 kV 之间, UPFC 并联变压器额定抽头电压按(505±8×1.25%) kV 考虑。

## 4　短路电流计算

以 2018 年为计算年份,远景年考虑苏州地区特高压苏州站 2×3000 MV·A 主变接入苏州南部 500 kV 电网供电。相关变电站的 500 kV 母线三相短路电流计算结果见表 4 所示。

**表 4　UPFC 接入前后短路电流计算结果　　kA**

| 系统方式 | 木渎变 | 梅里变 | 苏州站 |
|---|---|---|---|
| 投产年接入前 | 49.70 | 50.59 | 41.92 |
| 投产年接入后 | 49.60 | 50.50 | 41.87 |
| 远景年 | 52.75 | 51.79 | 47.88 |

在系统故障时,晶闸管旁路开关 TBS 会迅速闭合,串联变压器阀侧被旁路,相当于串联变压器漏抗串在线路中,有助于抑制系统短路电流;此时,串联变压器网侧绕组会流过较大的短路电流(与线路短路电流相等)。因此,为降低串联变压器的制造难度,应考虑降低串联变压器网侧绕组的短路电流设计水平。综合考虑串变短路电流限制及换流器容量选择的需求,串变短路阻抗按 20%考虑。

由计算结果可见,所有方式下 500 kV 母线最大短路电流为 53 kA,去除木渎—梅里对应线路分支影响,并计及串变短路阻抗影响,经计算串变绕组的故障电流为 37 kA。考虑到未来电网发展,500 kV 系统短路电流水平按 63 kA 考虑,全开机、全接线方式下,在木梅线木渎侧发生三相金属性短路、短路点电流接近 63 kA 时,由线路木渎侧短路电流接近 52 kA。故在串联变压器绕组抗短路能力选择时,计及短路阻抗影响,经计算流过串变绕组的故障电流约为 42 kA,最终考虑计算误差,串变绕组抗短路能力取为 45 kA。

## 5　主设备参数选择

### 5.1　换流器

根据计算,换流器容量取250 MV·A/180 MW,采用 MMC 结构,IGBT 采用3300 V/1500 A 器件。综合考虑 IGBT 额定电压和额定电流参数,可估算出:直流系统电压为±90 kV,直流电流为1000 A。

根据柔性直流和 UPFC 工程的运行经验,并联侧换流器的额定交流电压的选取考虑零功率运行时换流器输出调制比约为 0.85,由此可以计算出并联侧 MMC 阀侧额定电压约为 93.7 kV,故并联侧 MMC 阀侧额定电压取为 94 kV,额定交流电流为 1536 A,相应可计算出其桥臂电流的有效值约为 837 A。经核算,通过与并变分接头配合,并联侧额定电压取 94 kV 可满足并联 MMC 在整个运行范围内调制比小于 1。

串联变压器阀侧额定电压的选取除了考虑换流器正常运行时 MMC 调制比不大于 1,还需要考虑换流阀桥臂电流满足额定运行的要求,由于 UPFC 阀侧交流电流是由线路电流经串联变压器耦合过来的,因此,串联变压器变比的选择决定了串联侧换流器阀侧的额定电流。综合考虑上述 2 个因数,经仿真计算验证,串联变压器阀侧电压取为 105 kV,对应阀侧额定电流为 1.65 kA,相应桥臂额定电流约为 890 A。

根据系统计算,串联的 MMC 容量取 250 MV·A,由此计算出其额定工作电压为 87.5 kV。综合考虑各种运行工况,根据图 5 所示 UPFC 串联侧等效回路可知,串联侧 MMC 理论上输出电压(内电势 $E_a$)最大值计算条件为同时满足:(1) 提升线路电流至额定电流;(2) MMC 阀侧电压达到额定电压;(3) 串联 MMC 与系统交换全部为无功功率。其中,$L_0$为桥臂电抗器电抗值,$L_T$为串联变压器网侧/阀侧间的漏抗,$k$ 串变阀侧/网侧电压变比。

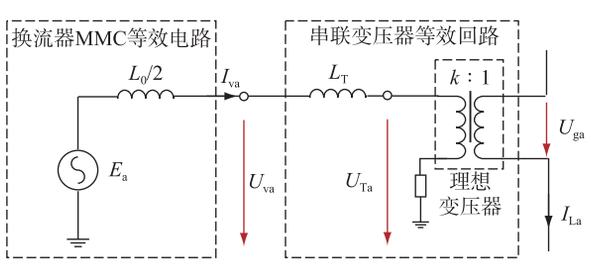



**图 5　UPFC 串联侧等效回路**

基于以上条件,计及桥臂电抗器(电抗值 36 mH),可计算出串联 MMC 最大输理论输出电压(内电势)为 103.7 kV,相量图如图 6 所示,对应调制比为 0.942。考虑实际运行中串联 MMC 在控制线路有功潮流时,其与系统交换的不完全是无功功率,故实际 MMC 输出的电压会更小,因此,本工程串联侧 MMC 的调制比有足够裕度。

### 5.2　并联变压器

并联变压器为普通三绕组 500 kV 变压器,接线组别:YN0/YN/d11,高中短路阻抗按 10%考虑,电压变比为 505±8×1.25%/94/36 kV,各侧额定容量为 300/300/100 MV·A,采用自然油循环风冷方式。高压绕组在中性点处串入调压线圈,采用三相有载调压分接开关实现高压绕组的中性点调压。

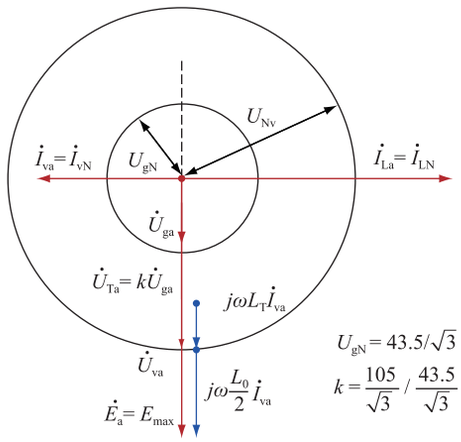



图 6　UPFC 串联侧 MMC 最大输出电压时相量

### 5.3　串联变压器

串联变压器采用单相三绕组变压器，网侧/阀侧容量为 300/300 MV · A，网侧/阀侧短路阻抗按 20%考虑，串联变压器带平衡绕组，网侧/阀侧联接组别为 III/$Y_N$，额定电压比为 43.5 kV/105 kV。串联变压器可在承受 45 kA 的短路电流下运行 2 s。

## 6　结束语

本文结合苏州南部 500 kV 电网供电能力提升、特高压直流功率消纳等问题，总结了 UPFC 在苏南 500 kV 电网中应用的可行性及技术方案，苏南 500 kV UPFC 投运后将具备如下作用：针对苏南电网冬季大负荷方式情况，锦苏直流小方式下，消除梅里木渎断面 $N-1$ 过载的问题；夏季大方式情况，锦苏直流大方式下发生双极闭锁时，通过提升地区电网供电能力，减小苏南地区切负荷量；通过 UPFC 无功电压控制，提供苏南地区电网电压恢复水平，一定程度上减少锦苏直流发生换相失败。

**参考文献：**

[1] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器技术及应用[M]. 北京：中国电力出版社，2015：28.
[2] 赵成勇. 柔性直流输电建模和仿真技术[M]. 北京：中国电力出版社，2014：35.
[3] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器工程实践——南京西环网统一潮流控制器示范工程[M]. 北京：中国电力出版社，2015：20.
[4] 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.
[5] 荆　平，周　飞，宋洁莹，等. 采用模块化结构的统一潮流控制器设计与仿真[J]. 电网技术，2013，37(2)：356-361.
[6] 姜舒婷，齐　磊，崔　翔，等. 含潮流控制器的直流电网潮流计算方法[J]. 电网技术，2015，39(7)：1793-1799.
[7] 朱鹏程，刘黎明，刘小元，等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化，2006，30(1)：45-51.
[8] 林金娇，李　鹏，孔祥平，等. 南京西环网 UPFC 保护系统及配合策略[J]. 江苏电机工程，2015，34(6)：56-60.
[9] 姜崇学，戴　阳，王　莹，等. 统一潮流控制器保护功能配置研究[J]. 江苏电机工程，2015，34(6)：6-9.
[10] 潘　磊，李继红，田　杰，等. 统一潮流控制器的平滑启动和停运策略[J]. 电力系统自动化，2015，39(12)：159-165.
[11] 鲁　江，秦　健，潘　磊，等. 南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 江苏电机工程，2015，34(6)：1-5.

作者简介：



李　鹏

李　鹏(1982—)，男，陕西周至人，高级工程师，从事电力系统继电保护、直流控保技术等研究工作；

林金娇(1989—)，女，山东栖霞人，工程师，从事电力系统继电保护、电力系统数字仿真及柔性直流输电技术研究工作；

孔祥平(1988—)，男，江西上饶人，博士，从事电力系统继电保护、直流输电及柔性输电技术等研究工作。

## Application of UPFC in the 500 kV Southern Power Grid of Suzhou

LI Peng, LIN Jinjiao, KONG Xiangping

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract**: To enhance the power supply capacity and solve the problem for UHVDC power assumption of 500 kV power network in Suzhou, the feasibility research on the application of UPFC in 500 kV Southern Power Grid of Suzhou is carried out. Combined with the scheme of UPFC integrated and its topology structure, the capacity of UPFC is determined by system calculation and the principle for the key parameters selection of UPFC main equipment are supplied. The effect of UPFC on the power flow and voltage regulation of 500 kV power grid in southern Suzhou is verified by simulation, which indicate that under the heavy load condition of Suzhou power network in winter, the regulation of UPFC can eliminate the key section overload problem as N- 1,while under the heavy load condition in summer, it can decrease the capacity of load shedding as the UHVDC bipolar blocked. The reactive power control of UPFC can provide the dynamic voltage support for power grid, which is benefit to decrease the probability and duration time of commutation failure of UHVDC.

**Key words**: UPFC; modular multi-level converter; series transformer