

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190805

## UPFC 与 IPFC 提升系统输电能力比较研究

吴熙<sup>1</sup>, 王亮<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 刘玓<sup>2</sup>, 陶加贵<sup>2</sup>, 滕松<sup>2</sup>, 陈轩<sup>3</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网江苏省电力有限公司科信部, 江苏 南京 210024;  
3. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 随着电力系统负荷及网架的日益发展, 由系统潮流分布不均而引起的输电阻塞问题越来越严重, 极大地制约了电力系统的输电能力与效率。利用 FACTS 设备提升电力系统输电能力相较于传统方案具有占地面积小、可控性高等多方面的优势。UPFC 与 IPFC 作为先进的第三代 FACTS 装置, 在潮流调控方面均有着突出的应用优势。因此有必要对两者在提升系统输电能力方面进行技术经济比较研究, 用以指导实际工程的解决方案选择。首先基于附加功率注入法分别对 UPFC 及 IPFC 进行稳态建模, 推导了其数学表达式。之后以江苏南通西北片电网为例, 将所建模型应用于实际电力系统, 计算结果显示两者均能大幅提升系统输电能力以及安全可靠。最后在多种工况下对这两种解决方案进行了技术经济比较分析, 结果表明 IPFC 相较于 UPFC 而言在潮流调控方面的作用更为全面与突出。

**关键词:** 统一潮流控制器; 线间潮流控制器; 功率注入模型; 系统输电能力

### Comparative research on UPFC and IPFC enhancing transmission capability of a power system

WU Xi<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>, TAO Jiagui<sup>2</sup>, TENG Song<sup>2</sup>, CHEN Xuan<sup>3</sup>

(1. School of Electric Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. Department of Science and Technology, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;  
3. Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** With the development of power system load and grid structure, the transmission congestion caused by the uneven distribution of power flow becomes more and more serious, which greatly restricts the transmission capacity and efficiency of power system. Compared with the traditional scheme, FACTS has many advantages, such as small space, high controllability, etc. As the advanced third generation FACTS, UPFC and IPFC have advantages in power flow regulation. Therefore, it is necessary to study the technology and economy of the two in improving the transmission capacity of the system, so as to guide the selection of practical engineering solutions. First, based on the additional power injection method, the models of UPFC and IPFC are established. Then, taking the northwest power grid of Nantong as an example, calculations show that both can greatly improve the transmission capacity and safety reliability of the system. Finally, technical and economic solutions are explored under various working conditions. IPFC plays a more comprehensive and prominent role than UPFC in power flow regulation.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGJSJX00YJJS 1800739) and National Natural Science Foundation of China (No. 51407028).

**Key words:** unified power flow controller; interline power flow controller; power injection model; transmission capability of power system

## 0 引言

在社会负荷不断增长、输电网架结构日益复杂、新能源大规模接入等背景下, 骨干网络潮流分布不

均、电压支撑能力不足、机电振荡等问题相互交织, 给电网运行与控制带来了新的挑战<sup>[1-3]</sup>。根据现有电网实际情况, 潮流分布不均已经成为制约交流输电系统潮流输送能力的重要因素<sup>[4]</sup>, 亟待通过新技术与新设备的应用, 提高电网运行控制水平及输送能力, 挖掘已有电网供电潜力, 进一步优化电力系统的资源配置<sup>[5-6]</sup>。

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助 (SGJSJX00YJJS 1800739); 国家自然科学基金 (51407028)

随着电力电子器件与技术的发展, 柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission Systems, FACTS) 技术应运而生。较传统解决方法而言, FACTS 设备有着更快的响应速度、更频繁的控制、连续控制能力、更综合和灵活的控制功能等方面的优势<sup>[7]</sup>。近年来, 第三代 FACTS 设备统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)在我国实际工程中得以应用, 在电力系统潮流控制与电压稳定等方面做出了极大的贡献, 大大提升了系统的输电能力<sup>[8-9]</sup>。

线间潮流控制器 (Interline Power Flow Controller, IPFC)与 UPFC 同为第三代 FACTS 装置的代表性器件<sup>[10-11]</sup>。与 UPFC 不同的是, IPFC 可以同时控制多条输电通道潮流, 从而避免因 UPFC 潮流调控而继发的其他临近重载线路潮流过载的风险<sup>[12]</sup>。除此之外, 即使在 IPFC 安装线路发生 N-1 故障的运行工况下, IPFC 仍可以通过相应的控制模式切换, 继续对系统潮流加以控制, 避免故障影响扩大化。因此在某些应用工况下, 相较于 UPFC 而言 IPFC 在潮流调控方面有着一定的应用优势。

为评估 UPFC 与 IPFC 在实际系统中的应用效果, 本文首先基于功率注入法分别建立了 UPFC 与 IPFC 的稳态潮流计算模型, 然后结合江苏如东片区电网的实际潮流问题, 将所建模型应用于实际电网, 分别提出了利用 UPFC 及 IPFC 提升电网输电能力的技术方案, 通过对两方案的技术经济性比较, 分析了 UPFC 与 IPFC 在实际系统中的应用特点, 总结了典型场景下两设备的应用优势, 为解决实际电网潮流阻塞问题的方案选择提供一定参考。

## 1 UPFC 工作原理及稳态数学模型

### 1.1 UPFC 工作原理

图 1 为 UPFC 简化等效示意图。其中,  $V_i \angle \theta_i$  与  $V_j \angle \theta_j$  为线路首末节点电压;  $V_{se} \angle \theta_{se}$  与  $V_{sh} \angle \theta_{sh}$  分别为 UPFC 串、并联侧等效输出电压;  $X_{se}$  与  $X_{sh}$  为串、并联侧变压器等效阻抗;  $g_{ij}$  与  $b_{ij}$  分别为受控线路等效电导与电纳;  $i_{ij}$  与  $i_{sh}$  分别为 UPFC 串、并联侧输出电流。

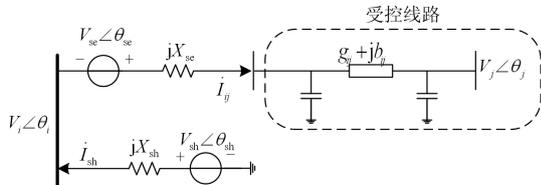


图 1 UPFC 简化等效电路示意图

Fig. 1 Equivalent simplified equivalent circuit of UPFC

$$\operatorname{Re}(V_{se} \angle \theta_{se} \cdot i_{ij} + V_{sh} \angle \theta_{sh} \cdot i_{sh}) = 0 \quad (1)$$

将 UPFC 两换流器等效为两大小及相角可灵活调节的理想电压源<sup>[13-14]</sup>。两换流器在满足式(1)有功功率守恒的前提下, 通过输出一个电压分量, 等效改变系统参数。其中串联侧换流器完成对受控线路有功、无功功率的控制, 而并联侧换流器由于需要进行直流侧稳压, 一般仅完成对并联侧换流器所在节点母线电压的调控。

### 1.2 UPFC 稳态数学模型建立

如图 2 所示, 根据功率注入法<sup>[15]</sup>将 UPFC 两换流器对系统的影响等效为对于母线节点  $i$  与虚拟附加节点  $m$  的功率注入  $P_{is} + jQ_{is}$  与  $P_{ms} + jQ_{ms}$ 。

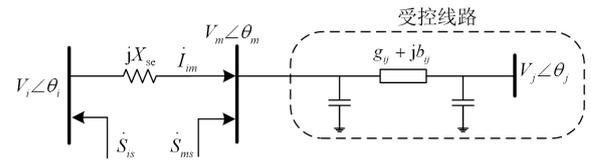


图 2 UPFC 等效功率注入模型示意图

Fig. 2 Equivalent power injection model of UPFC

忽略换流器损耗, 则有

$$P_{ref} + jQ_{ref} = \dot{V}_m \cdot \dot{I}_{im}^* = \dot{V}_m [(V_i + V_{se} - V_m) / jX_{se}]^* \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{ms} = P_{ms} + jQ_{ms} &= V_m \angle \theta_m \cdot (V_{se} \angle \theta_{se} / jX_{se})^* = \\ &= V_m [V_{se} \sin(\theta_m - \theta_{se}) - V_i \sin(\theta_m - \theta_i)] / X_{se} + \\ &= jV_m [V_i \cos(\theta_m - \theta_i) - V_{se} \cos(\theta_m - \theta_{se}) - V_m] / X_{se} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{is} = P_{is} + jQ_{is} &= V_i \angle \theta_i \cdot (-V_{se} \angle \theta_{se} / jX_{se})^* + \\ &= V_i \angle \theta_i \cdot [(V_{sh} \angle \theta_{sh} - V_i \angle \theta_i) / jX_{sh}]^* = \\ &= -jV_i \{ [V_i + V_m \cos(\theta_i - \theta_m) - V_{se} \cos(\theta_i - \theta_{se})] / \\ &= X_{se} + [V_i - V_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh})] / X_{sh} \} - P_{ms} \end{aligned} \quad (4)$$

首先, 当 UPFC 控制指令值  $P_{ref}$  与  $Q_{ref}$  给定时, 根据式(2)可求得 UPFC 串联侧换流器等效输出参数  $V_{se}$  与  $\theta_{se}$ 。之后将 UPFC 控制指令值  $V_{iref}$  代入式(4), 即可求得 UPFC 并联侧换流器等效输出参数  $V_{sh}$  与  $\theta_{sh}$ 。利用 UPFC 控制参数可求得各节点注入功率, 代入潮流方程不断迭代直至控制目标值收敛至指令值  $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$ 。具体流程如图 3 所示。

## 2 IPFC 工作原理及稳态数学模型

### 2.1 IPFC 工作原理

如图 4 所示, 与 UPFC 串联侧一样, IPFC 通过串联耦合变压器将其各换流器耦合接入线路, 完成对安装线路的潮流调控。

与 UPFC 不同的是, UPFC 一般仅控制单一通道潮流, 而 IPFC 一般同时控制多条输电通道潮流。除此之外, IPFC 并不需要利用额外的并联侧换流器

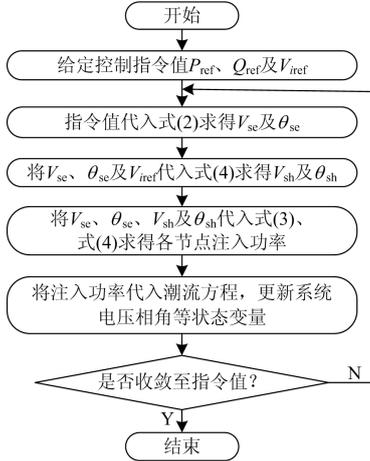


图 3 UPFC 稳态数学模型流程图

Fig. 3 Flow chart of UPFC steady state mathematical model

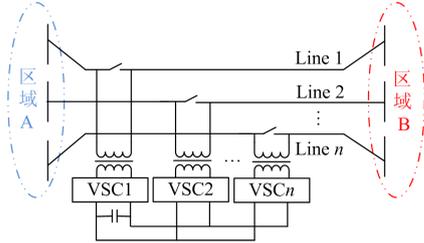


图 4 IPFC 简化结构示意图

Fig. 4 Simplified structure of IPFC

进行直流电容稳压, 仅需选取一条潮流裕度较大的线路作为其辅控线路, 由该线路耦合换流器进行公共直流母线的电容稳压<sup>[16]</sup>。

图 5 给出一种简化的两端口 IPFC 等效电路示意图, 各物理量含义与 1.1 节中 UPFC 相似。将主控线路及辅控线路换流器的作用等效为两大大小及相角可灵活调节的理想电压源<sup>[17-19]</sup>。IPFC 在满足式(5)有功功率平衡约束的前提下, 通过两换流器对系统注入电压, 等效改变系统参数, 从而达到对各自线路潮流的调控效果<sup>[20-21]</sup>。由于式(5)的等式约束, IPFC 辅控线路潮流不完全可控, 且控制目标为有功或无功功率控制模式。除了辅控线路以外, 其他 IPFC 安装线路潮流均完全可控, 控制模式为有功及无功功率控制模式<sup>[22-23]</sup>。

$$\text{Re}(V_{seij} \angle \theta_{seij} \cdot \dot{I}_{seij} + V_{seik} \angle \theta_{seik} \cdot \dot{I}_{seik}) = 0 \quad (5)$$

## 2.2 IPFC 稳态数学模型建立

与 UPFC 相似, 仅考虑简化的 IPFC 结构, 给出了图 6 所示的 IPFC 等效功率注入图。将 IPFC 两换流器多系统的作用等效为对于母线  $i$  及两虚拟附加节点  $m$ 、 $n$  的功率注入。

忽略换流器损耗, 则有

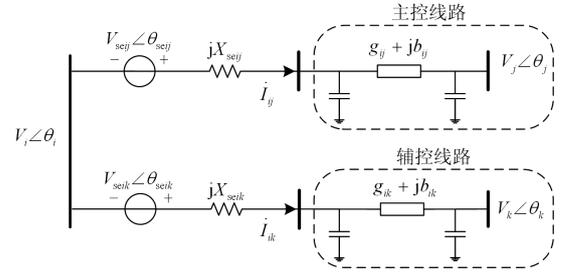


图 5 IPFC 简化等效电路示意图

Fig. 5 Simplified equivalent circuit diagram of IPFC

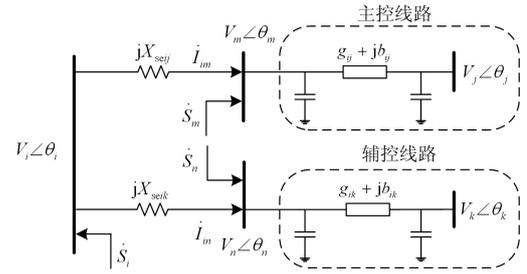


图 6 IPFC 稳态潮流模型示意图

Fig. 6 Steady-state power flow model of IPFC

$$P_{ijref} + jQ_{ijref} = \dot{V}_m \cdot \dot{I}_{im}^* = \dot{V}_m \cdot [(\dot{V}_i + \dot{V}_{seij} - \dot{V}_m) / jX_{seij}]^* \quad (6)$$

$$P_{ikref} + jQ_{ik} = \dot{V}_n \cdot \dot{I}_{in}^* = \dot{V}_n \cdot [(\dot{V}_i + \dot{V}_{seik} - \dot{V}_n) / jX_{seik}]^* \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_m = P_m + jQ_m = V_m \angle \theta_m \cdot (V_{seij} \angle \theta_{seij} / jX_{seij})^* = \\ V_m [V_{seij} \sin(\theta_m - \theta_{seij}) - V_i \sin(\theta_m - \theta_i)] / X_{seij} + \\ jV_m [V_i \cos(\theta_m - \theta_i) - V_{seij} \cos(\theta_m - \theta_{seij}) - V_m] / X_{seij} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_n = P_n + jQ_n = V_n \angle \theta_n \cdot (V_{seik} \angle \theta_{seik} / jX_{seik})^* = \\ V_n [V_{seik} \sin(\theta_n - \theta_{seik}) - V_i \sin(\theta_n - \theta_i)] / X_{seik} + \\ jV_n [V_i \cos(\theta_n - \theta_i) - V_{seik} \cos(\theta_n - \theta_{seik}) - V_n] / X_{seik} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_i = P_i + jQ_i = -V_i \angle \theta_i \cdot (V_{seij} \angle \theta_{seij} / jX_{seij})^* - \\ V_i \angle \theta_i \cdot (V_{seik} \angle \theta_{seik} / jX_{seik})^* \end{aligned} \quad (10)$$

首先, 当 IPFC 主控线路控制目标指令值  $P_{ijref}$  及  $Q_{ijref}$  给定时, 将其值代入式(6)求得 IPFC 主控线路换流器控制参数。之后, 将辅控线路控制目标指令值  $P_{ikref}$  代入式(7)并联立式(5), 即可求得 IPFC 辅控线路换流器控制参数。最后将 IPFC 控制参数代入式(8)一式(10)即可求得各节点附加注入功率, 将所得注入功率叠加至潮流模型, 不断迭代直至控制目标值收敛至指令值  $P_{ijref}$ 、 $Q_{ijref}$  及  $P_{ikref}$ 。具体流程与图 3 中 UPFC 类似, 此处不再赘述。



扑结构示意图。

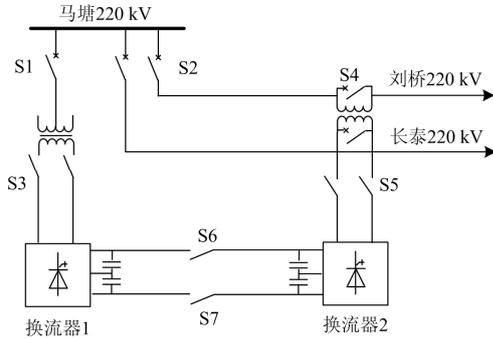


图 8 UPFC 一次拓扑结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of UPFC topology

在马塘-长泰线路发生  $N-1$  故障时,通过 UPFC 将其所在的马塘-刘桥线路潮流调控至线路稳定限额 400 MW,避免  $N-1$  后马塘-刘桥线路的越限风险,表 2 给出了 UPFC 在不同运行情况下的切换逻辑。

然而,马塘-刘桥与马塘-长泰线路均有  $N-1$  潮流越限风险。UPFC 仅能控制马塘-刘桥线路潮

流,当该线路发生  $N-1$  故障时,UPFC 串联侧只能退出运行,此时马塘-长泰线路依旧过载。因此,该方案仍需要适当下调新能源出力系数,减少断面输送潮流,使得马塘-刘桥  $N-1$  故障后,马塘-长泰线路有功功率在其热稳定极限 400 MW 以下。表 3 给出了 UPFC 方案在不同运行工况下的各项参数。

表 2 UPFC 在不同运行工况下的切换逻辑

Table 2 Switching logic of UPFC under different running conditions

运行方式	开关情况	运行情况
正常方式	S4 开路, S1、S2、S3、S5、S6、S7 闭合	UPFC 模式运行,控制马塘 220 kV 母线电压且适当降低马塘-刘桥线路潮流
马塘-长泰 $N-1$	S4 开路, S1、S2、S3、S5、S6、S7 闭合	UPFC 模式运行,控制马塘 220 kV 母线电压且将马塘-刘桥线路有功功率控制至线路限制
马塘-刘桥 $N-1$	S5、S6、S7 开路, S1、S2、S3、S4 闭合	STATCOM 模式运行,串联侧退出运行,并联侧维持马塘 220 kV 母线电压稳定

表 3 UPFC 方案各项参数

Table 3 Parameters of UPFC scheme

算例	UPFC 各节点注入功率/p.u.		UPFC 控制参数/p.u.,rad		控制目标/MW	总容量/MW
	马塘母线	UPFC 附加节点	$V_{sc}$	$\theta_{sc}$		
稳态运行	-5.749+0.236j	5.749+0.100j	0.057	-0.447	281×2	25.97
马塘-长泰 $N-1$	-6.925+0.431j	6.925+0.157j	0.068	-0.435	400	32.85
马塘-刘桥 $N-1$	—	—	—	—	—	—

(3) 对重载的马塘-刘桥及马塘-长泰加装 IPFC。

图 9 为 IPFC 一次拓扑结构,通过对马塘-刘桥及马塘-长泰线路加装 IPFC 的方案,稳态时协调并均衡两通道潮流分布。在两回通道发生  $N-1$  故障后,故障通道换流器退出运行并切断公共直流母线,剩余一回线路中的 IPFC 切换为 SSSC 运行模式,继续控制其所在线路潮流为线路热稳定极限值,避免

$N-1$  故障后发生潮流越限的风险。表 4 给出了不同场景下 IPFC 模式切换逻辑。

表 4 IPFC 在不同运行工况下的切换逻辑

Table 4 Switching logic of IPFC under different running conditions

运行方式	开关情况	运行情况
正常方式	S2、S3 开路, S1、S4、S5、S6、S7 闭合	IPFC 模式运行,两换流器分别耦合接入马塘-刘桥及马塘-长泰线路,均衡通道潮流
马塘-长泰 $N-1$	S3、S4、S6、S7 开路, S1、S2、S5 闭合	SSSC 模式运行,换流器 1 退出运行,换流器 2 控制马塘-刘桥线路有功功率至线路限值
马塘-刘桥 $N-1$	S2、S5、S6、S7 开路, S1、S3、S4、S5 闭合	SSSC 模式运行,换流器 2 退出运行,换流器 1 控制马塘长泰线路有功功率至线路限值

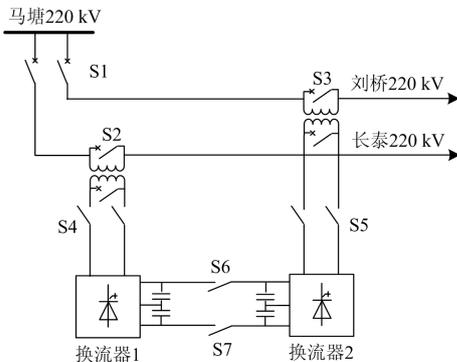


图 9 IPFC 一次拓扑结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of IPFC topology

图 10 给出了三种解决方案下外送潮流断面输电容量以及新能源消纳容量的对比。通过计算,采用 UPFC 方案并适当降低新能源并网容量后,断面极限输送容量为 1 188.8 MW,相较于未采用 UPFC 前提升 15.53%的断面输送容量;新能源消纳容量共

计 2 625.4 MW, 相较于未采用 UPFC 前提升 15.90% 的新能源消纳容量。采用 IPFC 方案后, 无需降低新能源出力。新能源大发时, 断面可输送潮流为 1 364.3 MW, 相较于未安装 IPFC 前提升 32.6% 的输电容量; 新能源消纳容量约为 2 972 MW, 相较于未安装 IPFC 前提升 31.23% 的输电容量。

通过对图 10 及表 3、表 5 中的数据进行分析, 不难发现, UPFC 与 IPFC 设备对系统输电能力的提升有较大作用, 与此同时也进一步提升了系统新能源消纳能力。UPFC 与 IPFC 在满足各自的多种运行工况下, 所需要最小换流器容量分别为 32.85 MW 以及 38.02 MW, 分别提升了 159.8 MW、335.3 MW 的断面输电容量以及 360.7 MW、707.3 MW 的新能源消纳能力, 经济效益显著。除此之外, 通过 UPFC 及

IPFC 设备的安装, 系统输电的安全性与潮流的灵活可控性也得到了较大的提高。

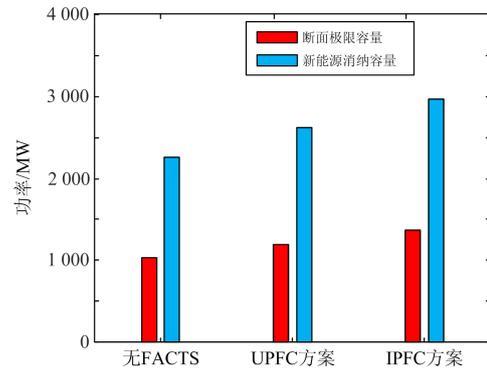


图 10 各解决方案数据对比

Fig. 10 Data comparison of solutions

表 5 IPFC 方案各项参数

Table 5 Parameters of IPFC scheme

算例	IPFC 各节点注入功率/p.u.			IPFC 控制参数/p.u.,rad				控制目标/ MW	总容量 /MW
	马塘母线	附加节点 1	附加节点 2	$V_{seij}$	$\theta_{seij}$	$V_{seik}$	$\theta_{seik}$		
稳态运行	-9.453+0.100j	6.852+0.106j	2.602+0.153j	0.069	-0.295	0.026	-0.278	376×2	27.73
马塘-长泰 N-1	-7.322+0.202j	7.322+0.102j	—	0.074	-0.283	—	—	400	38.02
马塘-刘桥 N-1	-2.010+0.155j	—	2.010+0.235j	—	—	0.020	-0.264	400	38.02

## 4 结论

本文针对现有电网因潮流分布不均而引起的输电瓶颈问题, 提出了一种利用 UPFC 及 IPFC 设备提升系统输电能力的方案, 所得结论如下。

(1) UPFC 与 IPFC 均能完成对于系统潮流的调控, 并大幅提升系统的输电能力, 经济效益显著。

(2) 相较于 UPFC 一般仅控制单一通道潮流, IPFC 一般同时控制多条通道潮流, 在 UPFC 安装目标线路 N-1 故障后, UPFC 失去潮流调控能力, 但 IPFC 能在目标线路发生 N-1 故障后通过自身拓扑切换改变为 SSSC 运行模式, 继续完成对系统潮流的调控, 保证 N-1 故障后维持系统的稳定运行。

(3) 由于 IPFC 同时对多条通道进行潮流调控, 因此在多回路重载的应用工况下, IPFC 相较 UPFC 提升系统输电能力的作用更大, 更具应用优势。

(4) 相较于 UPFC 而言, IPFC 对于维持系统电压稳定的能力较弱, 因此对于系统无功补偿需求较大的应用工况下, UPFC 更具应用优势。

## 参考文献

[1] 李国庆, 宋莉, 李筱婧. 计及 FACTS 装置的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 36-42.  
LI Guoqing, SONG Li, LI Xiaojing. Available transfer capability calculation considering FACTS controllers[J].

Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 36-42.

- [2] 孙宇宇, 刘建坤, 陈静, 等. 基于柔性负荷及 UPFC 的低频振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 82-87.  
SUN Ningyu, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Low frequency oscillation suppression method based on flexible load and UPFC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 82-87.
- [3] 张尚, 王涛, 顾雪平, 等. 基于输电网络结构优化的电网安全均匀调度[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2957-2963.  
ZHANG Shang, WANG Tao, GU Xueping, et al. Power grid homogeneous dispatch based on transmission topology optimization[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2957-2963.
- [4] 吴熙, 殷天然, 祁万春, 等. 考虑新型拓扑结构的统一潮流控制器五端功率注入模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 161-168.  
WU Xi, YIN Tianran, QI Wanchun, et al. Five-terminal power injection model of UPFC considering novel topology structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 161-168.
- [5] BATHINA V R, MISHRA A, GUNDAVARAPU V N K, et al. Real power performance index and line stability index-based management of contingency using firefly algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,

- 2016, 10(10): 2327-2335.
- [6] AHMAD N, JAMSHID A, MASOOD P, et al. Contribution of FACTS devices in power systems security using MILP-based OPF[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(15): 3744-3755.
- [7] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [8] 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.
- [9] 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 Weiyuan, et al. Application of 500 kV UPFC in Suzhou southern power grid[J]. *Electric Power*, 2018, 51(2): 47-53.
- [10] MISHARA S K, TRIPATHY L N. A critical fault detection analysis & fault time in a UPFC transmission line[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 24-33. DOI: 10.1186/s41601-019-0117-5.
- [11] BHOWMICK S, DAS B, KUMAR N. An indirect IPFC model to enhance reusability of newton power-flow codes[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(4): 2079-2088.
- [12] 吴熙, 王亮, 陈曦, 等. 计及线间潮流控制器的电力系统潮流优化[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 4125-4132.
- WU Xi, WANG Liang, CHEN Xi, et al. Optimal power flow considering interline power flow controller[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 4125-4132.
- [13] 李仲青, 曹虹, 张和, 等. 500 kV UPFC 对工频变化率方向保护的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(22): 55-63.
- LI Zhongqing, CAO Hong, ZHANG He, et al. Analysis of the impact of 500 kV UPFC on impedance directional protection based on variation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(22): 55-63.
- [14] 祁欢欢, 陆振纲, 陈静, 等. 基于模块化多电平的统一潮流控制器换流器和直流侧故障特性分析及保护配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(20): 59-68.
- QI Huanhuan, LU Zhengang, CHEN Jing, et al. Converter and DC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 59-68.
- [15] ZARGHAMI M, CROW M L. The existence of multiple equilibria in the UPFC power injection model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(4): 2280-2282.
- [16] 高伯阳, 吴熙, 王亮, 等. 线间潮流控制器技术现状分析及展望[J]. *浙江电力*, 2019, 38(2): 7-14.
- GAO Boyang, WU Xi, WANG Liang, et al. Technical status and prospect of interline power flow controller[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(2): 7-14.
- [17] ZHANG Y, CHEN C. A novel power injection model of IPFC for power flow analysis inclusive of practical constraints[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(4): 1550-1556.
- [18] BHOWMICK S, DAS B, KUMAR N. An advanced IPFC model to reuse newton power flow codes[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 525-532.
- [19] 粟梅, 马进, 孙尧. 基于双级矩阵变换器的线间潮流控制器[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2008, 20(6): 17-21.
- SU Mei, MA Jin, SUN Yao. Interline power flow controller based on two-stage matrix converter[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2008, 20(6): 17-21.
- [20] NITHYA D, JANANISRI D, SOWJANYA M, et al. Performance assessment of IPFC in power transmission systems[C] // 2014 IEEE NCET NRES EM, December 16-17, 2014, Chennai, India: 84-86.
- [21] BABU D S, SAHU N, VENKATARAMU P S, et al. Development of a new model of IPFC for power flow in multi-transmission lines[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, 84(5): 33-37.
- [22] FARDANESH B, SCHUFF A. Dynamic studies of the NYS transmission system with the Marcy CSC in the UPFC and IPFC configurations[C] // 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas, USA: 1126-1130.
- [23] JIANG S, GOLE A M, ANNAKAGE U D, et al. Damping performance analysis of IPFC and UPFC controllers using validated small-signal models[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1): 446-454.

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-11-05

作者简介:

吴熙(1987—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统振荡分析与控制、柔性交流输电系统、分布式控制; Email: wuxi112233@163.com

王亮(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; Email: 517713417@qq.com

陈曦(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: 592234385@qq.com

(编辑 许威)