

南京电网UPFC潮流控制特性的综合性研究

中国第一台统一潮流控制器（UPFC）已于2015年底在江苏南京建成并投入实际运行。未安装UPFC之前，南京主城西部电网面临着主要输电走廊潮流分布不均衡的问题。南京UPFC通过调节铁北—晓庄220 kV安装线路的传输功率，改善整个南京西部电网潮流分布。主要针对南京UPFC强大的潮流控制特性展开综合性的研究。首先，依据潮流控制基本原理，详细推导了UPFC潮流控制方程。其次，依据南京电网实际运行数据，推算出南京UPFC潮流控制域，探究潮流控制域内调节功率变化对于控制参数的影响规律；计算分析南京UPFC提高线路传输功率和平衡潮流分布能力的大小，以及南京电网负荷中心容量提升上限。最后，通过计算含UPFC的电力系统最优潮流（OPF），分析得出南京UPFC潮流控制域内调节功率的改变对OPF计算结果的影响规律。

王旭¹ 任必兴² 蔡晖³ 杜文娟² 张建鹏² / 1. 国网江苏省电力公司
2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 3. 国网江苏省电力公司经济技术研究院

0 引言

1991年，美国西屋科技中心L. Gyugyi博士首创统一潮流控制器（Unified Power Flow Controller, UPFC）的概念^[1]。UPFC是迄今为止FACTS系列中性能最强的一种综合补偿器。目前，世界上真正投入工业化运行的UPFC已有3套，分别为位于美国电力公司（AEP）的Inez变电站、韩国电力公司（KEPCO）的Kangjin变电站和美国纽约电力局（NYP&A）的Marcy变电站，

大规模柔性输电装置接入对江苏特高压交直流电网的影响研究（国家电网公司科技项目：SGJS0000FZJS1501126），省级公司“世界一流电网”建设评估与决策优化关键技术及应用研究（国家电网公司科技项目：GHJS1500008）。

其成功运行被视作FACTS技术发展史上的重要里程碑^[2-4]。中国第一台UPFC已于2015年底在江苏南京建成并投入实际运行。南京UPFC首次采用模块化多电平换流器（MMC），相比于已投运的3台GTO-UPFC，MMC-UPFC具有谐波特性好、占地面积小、换流器损耗低和控制灵活性高等优点^[5]。

近年来，国内外许多学者对于UPFC的稳态潮流调节功能，从电力市场、电网调度、UPFC最佳安装地点和优化算法等方面展开了较为深入的研究，取得了一系列的研究成果。文献[6-7]主要研究了计及UPFC的电网无功优化问题。文献[8-10]主要研究了电力市场环境计及UPFC等FACTS装置的最大输电能力与可用输电能力的数学模型以及求解方法。文献[11]主要研究了电力市场环境计及UPFC装置的电网阻塞调度问题。文献[12]推导了系统电量不足期望对UPFC容量的灵敏度表达式，提出了根据该灵敏度排序结果确定UPFC最优安装位置的方法，但是目前针对于计及UPFC调节能力的电力系统最优潮流研究得还不深入。

江苏省是能源消耗大省，同时又是资源供给小省，90%以上的一次能源由省外调入，是典型的电源、负荷分布不平衡省份。南京主城220 kV环网西部，主要供电范围为鼓楼区（含原下关区）、建邺区、栖霞新港地区和雨花经济开发区，是南京城网的主要负荷中心。装UPFC之前，西环网主要存在输电通道潮流不均衡的问题，龙王山变电站向西环网的220 kV输电通道潮流偏轻，



王旭/高级工程师

关键词/Keywords

统一潮流控制器 ·
南京电网 ·
潮流控制 ·
电力系统最优潮流 ·

而东善桥变电站向西环网的220 kV输电通道潮流较重；受到地区政策和停电计划等因素影响，常规线路改造升级计划难以落实。因此，南京电网安装UPFC装置具有较强可行性和工程实践意义^[13]。

本文主要针对南京UPFC强大的潮流控制特性展开综合性的研究。首先，从潮流控制的基本原理展开，推导UPFC潮流控制方程，求解UPFC潮流控制域。其次，UPFC采用附加节点稳态模型，探究潮流控制域内UPFC参数随功率变化的影响规律；计算分析UPFC对于南京电网潮流的改善效果。最后，通过考虑计及UPFC的电力系统最优潮流，分析得出UPFC潮流控制域内调节功率的变化对OPF计算结果的影响规律。

1 UPFC潮流控制

1.1 UPFC潮流控制方程

UPFC等效电路如图1所示，UPFC装设在线路节点1和2之间；UPFC用来控制节点3至2线路上的有功功率和无功功率。图1中， P_x 和 Q_x 分别为线路末端节点接收的有功功率和无功功率；电抗 X 不仅包括为UPFC节点3与线路节点2之间的线路电抗 X_L ，还包含有UPFC串联变压器的电抗 X_B 。

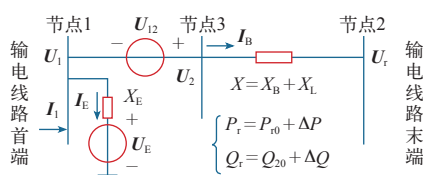


图1 UPFC等效电路

线路中加入UPFC的电压、电流相量之间的关系如图2所示。输电线上首端电压 U_1 超前于末端电压 U_x 的功角为 δ ，输电线上引入串联补偿电压 U_{12} 后，输电线的首端电压相当于变为 U_2 ，即 $U_2 = U_1 + U_{12}$ 。

由图2的相量图可知，串入的电压相量是超前于 U_1 相位角 α ，超前于 U_x 的相位角为 $\alpha + \delta$ 。当 α 在 $0 \sim 2\pi$ 之间任意变动时，如果串联补偿电压为 U_{12} ，根据叠加原理， U_{12} 所产生的线路电流增量 $\Delta I =$

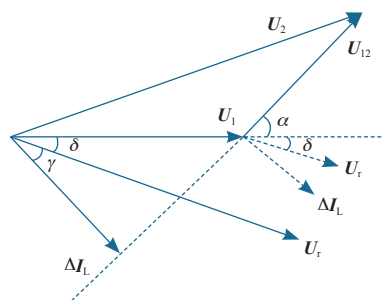


图2 UPFC等效电路

$U_{12}/(jX)$ ， ΔI 垂直滞后 U_{12} ，又 U_{12} 超前 U_x 角度 $\alpha + \delta$ ，故 ΔI 比 U_x 滞后 $\gamma = 90^\circ - (\alpha + \delta)$ 。 ΔI 的有功分量和无功分量为

$$\begin{cases} \Delta I_d = \Delta I \cos \gamma \\ \Delta I_q = \Delta I \sin \gamma \end{cases} \quad (1)$$

输电线末端接收的有功功率增量 ΔP 和无功功率增量 ΔQ 分别为

$$\begin{cases} \Delta P = U_x \Delta I_d = \frac{U_{12} U_x}{X} \sin(\delta + \alpha) \\ \Delta Q = U_x \Delta I_q = \frac{U_{12} U_x}{X} \cos(\delta + \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

加入串联补偿电压 U_{12} 后，输电线末端接收的功率为

$$\begin{cases} P_x = P_0 + \Delta P \\ Q_x = Q_0 + \Delta Q \end{cases} \quad (3)$$

P_0 和 Q_0 分别为 $U_{12} = 0$ 时线路传输有功功率和无功功率，即

$$\begin{cases} P_0(\delta) = \frac{U_1 U_x}{X} \sin \delta \\ Q_0(\delta) = \frac{U_x}{X} (U_1 \cos \delta - U_x) \end{cases} \quad (4)$$

对于给定的传输线功角 δ ，当 α 在 $0 \sim 2\pi$ 的范围内变化时，线路可控有功功率和无功功率的范围为

$$\begin{cases} -\frac{U_x U_{12\max}}{X} \leq \Delta P(\alpha) \leq \frac{U_x U_{12\max}}{X} \\ -\frac{U_x U_{12\max}}{X} \leq \Delta Q(\alpha) \leq \frac{U_x U_{12\max}}{X} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知。UPFC的潮流控制范围和传输线功角 δ 无关，只与串入电压的幅值 U_{12} 和相角 α 有关。线路上有功功率和无功功率的可控制增量

为以 $[P_0(\delta), Q_0(\delta)]$ 为圆心, $U_x U_{12\max}/X$ 为半径的一个圆域。在该圆域范围内, 可通过调整串入电压的幅值和相角来调节线路功率潮流。

假设传输线的功角为 $\delta = 30^\circ$, $U_1 = U_x = X = 1(\text{pu})$, $U_{12} = 0.5(\text{pu})$, 则线路潮流随串联电压变化的空间效果如图3所示。

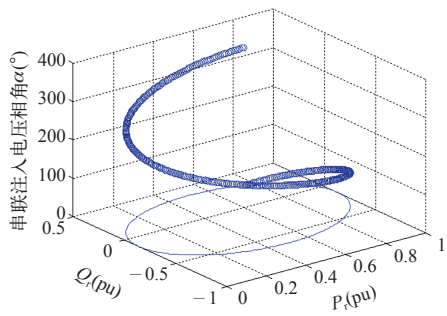


图3 线路潮流变化的空间效果图

1.2 UPFC稳态模型

UPFC的常用稳态计算模型主要有两种, 分别是功率注入模型^[14-15]和附加节点模型^[16-17]。功率注入模型的原理是将UPFC所在线路可调变量对系统的贡献移植到对应线路两侧节点上; 附加节点模型则是将安装UPFC的线路断开, 新增加两个节点。两种模型中, 功率注入模型的计算过程UPFC关联部分需要进行迭代求解, 计算量大且存在迭代误差。因此, 本文选择计算更加简便且实用的附加节点模型。

从图1可知, UPFC用来控制节点3至2线路上

的有功功率和无功功率, 同时调节节点1的电压。稳态时, 节点3至2线路上的有功功率和无功功率为设定目标值, 可以将其视为PQ节点, 等效为一个负荷。忽略UPFC内部有功损耗, 节点1注入系统的有功负荷等于节点3的有功负荷, 稳态时节点1电压保持恒定, 可视作PV节点。UPFC附加节点稳态模型如图4所示。

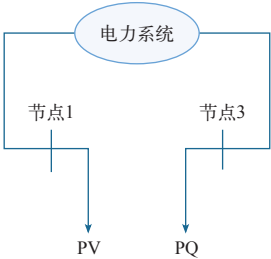


图4 UPFC稳态潮流模型

1.3 南京UPFC潮流控制域

南京电网UPFC安装地点位于铁北—晓庄220 kV线路, UPFC的基本参数如表1所示。地理接线图如图5所示。图5中显示的是220 kV以上电压等级线路。等效后南京电网有10台发电机, 323个母线, 441条线路, 72处负荷, 6个母线节点安装有无功补偿装置, 发电机组数据如表2所示。

表1 UPFC基本参数

	UPFC串联侧	UPFC并联侧
变压器阻抗 $U_k(\%)$	20	10
变压器额定容量/MV·A	70	60
额定线电压/kV	26.5	35

表2 南京等效电网发电机组数据

发电机名	基准容量/MV·A	基准电压/kV	有功出力上界/MW	有功出力下界/MW	无功出力上界/Mvar	无功出力下界/Mvar
苏大唐1 [#] 机	1 466	21	1 320	0	582	170
苏华金1 [#] 机	1 112	27	1 000	0	500	/
苏华金2 [#] 机	1 112	27	—	—	—	—
苏华京1 [#] 机	706	18	640	0	396	90
苏华润3 [#] 机	776	18	660	0	410	/
苏陵燃1 [#] 机	936	19	780	0	494	/
苏陵燃3 [#] 机	340	15	240	0	148	34
苏陵燃4 [#] 机	150	10.5	120	0	78	18
苏南热1 [#] 机	1 334	21	1200	0	480.00	180
苏宁热4 [#] 机	706	21	600	0	410	94

注: 苏华金2[#]机组为平衡机; 系统功率基准计算为100 MV·A

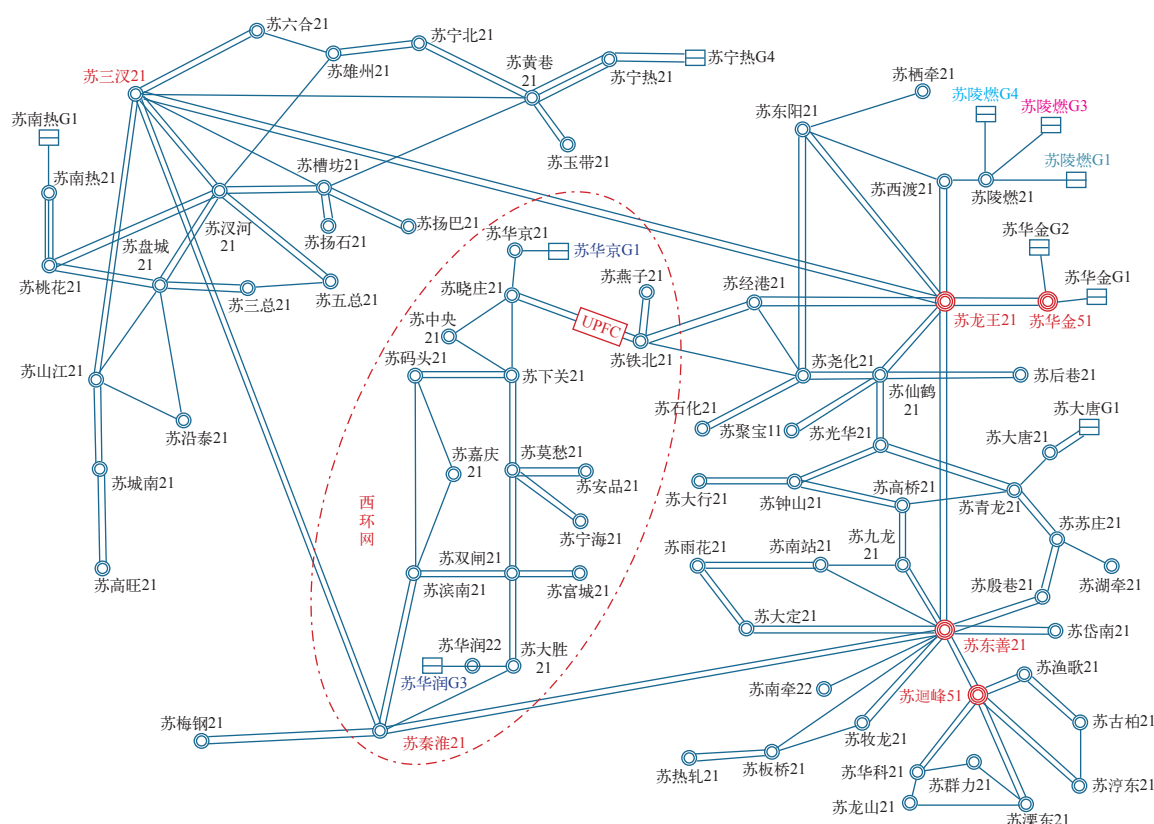


图5 南京电网地理接线图

铁北—晓庄段以外电网近似视作无穷大电网，按式（5）可计算得出南京电网UPFC潮流控制圆域，如图6所示。

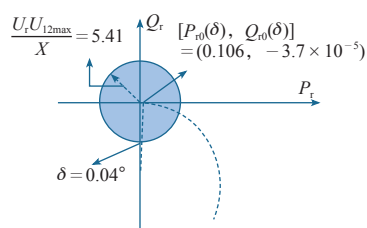


图6 UPFC潮流控制域

由图6可知，不考虑电网安全约束，仅从功率增量角度看，UPFC可调潮流圆域的半径约为500 MW，提高了铁北—晓庄段的线路功率传输能力。考虑南京网潮流流向、UPFC换流阀容量以及电网电压静态安全的约束，UPFC调节有功和无功功率的取值范围限定为

$$\begin{cases} P \in [0, 300] (\text{MW}) \\ Q \in [-150, 150] (\text{Mvar}) \end{cases}$$

1.4 潮流控制域内UPFC控制参数随线路调节功率的变化规律

在计算潮流后，可以得到图1中各节点的电压幅值和相位。由图1可知，UPFC与系统的电压接口方程为

$$\begin{cases} U_1 = jX_E I_E + U_E \\ U_B = U_{12} = U_2 - U_1 \end{cases} \quad (6)$$

系统的电流关系式为

$$\begin{cases} I_1 = I_E + I_B \\ I_B = U_2 - U_r \end{cases} \quad (7)$$

UPFC电压源方程式为

$$\begin{cases} U_E = V_e \angle \delta_e \\ U_B = V_b \angle \delta_b \end{cases} \quad (8)$$

结合式（6）~式（8），可计算UPFC串、并联电压源的端口电压 U_B 、 U_E 的幅值和相角。UPFC潮流控制域内控制参数变化曲线如图7所示。

由图7a和图7b可知，UPFC潮流控制域内，随着调节有功功率 P 和无功功率 Q 变化， δ_b 变化明显

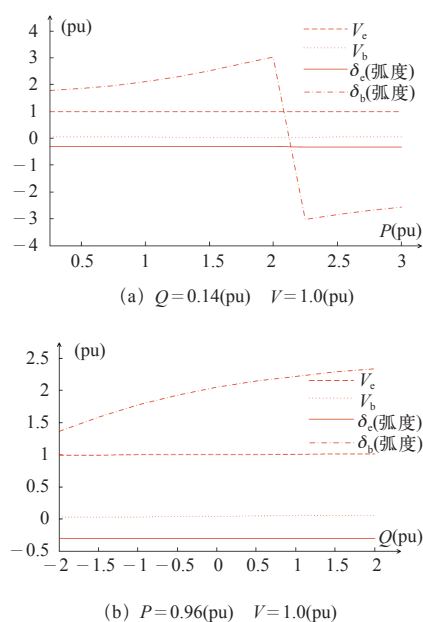


图7 UPFC控制参数在潮流控制域内的变化规律

且呈圆周变化趋势，而 δ_c 、 V_c 和 V_b 几乎无变化。可以得出，线路传输功率的改变主要受串联电压源相角变化的影响，也验证了式(5)的理论分析的正确性。

2 UPFC对于南京西环网供电能力的提升效果

南京西环网主要由东善桥变电站和龙王山变电站分别从南北两端共同供电。由图5可知，龙王山方向主要输电线有龙王一经港、经港—铁北、尧化—铁北；东善桥方向主要输电线有秦淮—滨南1线、秦淮—滨南2线。安装UPFC前后，主要输电线传输功率对比情况如表3所示。

表3 主要输电通道传输功率统计

传输线	线路额定有功/MW	线路传输有功/MW	
		无UPFC	有UPFC
经港—铁北	782	194	362
秦淮—滨南1线	704	364	282
秦淮—滨南2线	782	582	452

从表3可以看出，未装设UPFC时，经港—铁北的线路潮流偏轻；秦淮—滨南2线的线路潮流偏重。装设UPFC之后，提升了经港—铁北的传输有功功率，降低了秦淮—滨南1线、秦淮—滨南2线的传输有功功率。因此，UPFC明显改善原西环

网潮流不均的问题，使得输电功率更加平衡。

西环网负荷中心只要集中于苏下关、苏莫愁、苏富城和苏双闸等地。现提升西环网负荷有功容量，使负荷周边的任一传输线负载率达到100%，计算得出负荷提升容量极限，如表4所示。

表4 负荷中心提升容量

负荷中心	额定有功功率/MW	无UPFC，有功功率上界/MW	有UPFC，有功功率上界/MW
苏下关	181	181	380
苏莫愁	290	290	350
苏富城	217	217	400
苏双闸	251	350	380
总和	939	1 038	1 510

由表4可知，未装设UPFC时，晓庄南送下关、中央门断面潮流过重问题严重，直接影响了苏下关、苏莫愁和苏富城负荷容量的提升，只有苏双闸提升容量近100 MW；安装UPFC后，晓庄南送潮流过重问题得到有效解决，整个西环网负荷中心提升容量总和近600 MW，输电能力得到大幅度提升。

3 计及UPFC的OPF分析计算

3.1 计及UPFC的OPF模型

OPF中一般选取发电机有功出力最小为目标。目标函数为

$$\min \sum_{i \in S_G} (P_{Gi}) \quad (9)$$

计及UPFC的系统OPF的约束条件包括两部分：电力系统约束条件和UPFC性能参数约束条件。

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ i \in S_B \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \quad (i \in S_G) \quad (11)$$

$$Q_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \bar{Q}_{Gi} \quad (i \in S_R) \quad (12)$$

$$V_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad (i \in S_B) \quad (13)$$

$$|P_l| = |P_{ij}| = |V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij}| \leq \bar{P}_l \quad (l \in S_l) \quad (14)$$

$$V_{bmin} \leq V_b \leq V_{bmax} \quad (15)$$

$$V_{emin} \leq V_e \leq V_{emax} \quad (16)$$

式中, S_B 为系统所有节点集合; S_G 为所有发电机集合; S_R 为所有无功源集合; S_l 为所有支路集合; P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为发电机 i 的有功功率、无功出力; P_{Di} 和 Q_{Di} 为节点导纳矩阵的有功负荷、无功负荷; V_i 、 θ_i 为节点 i 电压幅值与相角, $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵第 i 行第 j 列元素的实部与虚部; P_l 为线路 l 的有功潮流, 设线路 l 两端节点为 i 、 j ; V_b 和 V_e 为UPFC串、并联电压源的端口电压幅值, 同式(8)。其中, 式(10)~式(14)为电力系统约束条件; 式(15)、式(16)为UPFC性能参数约束条件。OPF求解采用熟知的路径跟踪内点算法^[18-20]。

3.2 UPFC潮流控制域内调节功率的改变对OPF计算结果的影响规律。

节点电压和UPFC约束电压取值范围限定为

$$\begin{cases} V_i \in [0.94, 1.06](\text{pu}) & (i \in S_B) \\ V_E \in [0.98, 1.02](\text{pu}) \\ V_B \in [0.015, 0.065](\text{pu}) \end{cases} \quad (17)$$

电力系统调度运行中, 除了发电机有功出力最小之外, 整个系统线路有功、无功总网损最小也是经常考虑的目标。UPFC潮流控制域内的取值不同, 对于目标优化的结果也可能产生影响。

首先, 研究UPFC调节无功功率 Q_L 的变化对于发电机最小有功出力总和 P_{Gmin} 、线路有功总网损 P_{Loss} 和线路无功总网损 Q_{Loss} 的影响规律。当 P_L 一定时, P_{Gmin} 、 P_{Loss} 与 Q_{Loss} 随 Q_L 的关系变化曲线如图8所示。

由图8可知, 当 P_L 一定时, P_{Gmin} 、 P_{Loss} 和 Q_{Loss} 随着 Q_L 的增大而不断增大。其中, P_{Gmin} 增幅和 P_{Loss} 增幅较小, Q_{Loss} 增幅较大。最优潮流单一优化目标为发电机有功出力最小, 而对于发电机的无功出力仅为限制约束。 Q_L 从负变正不断增大的过程, 即龙王山变电站输电通道向西环网不断输入无功的过程, 从而使东善桥方向无功流向减小。因为龙王山方向是220 kV输电线路, 东善桥方向苏东善—苏秦淮是500 kV线路, 电压等级越低则线路

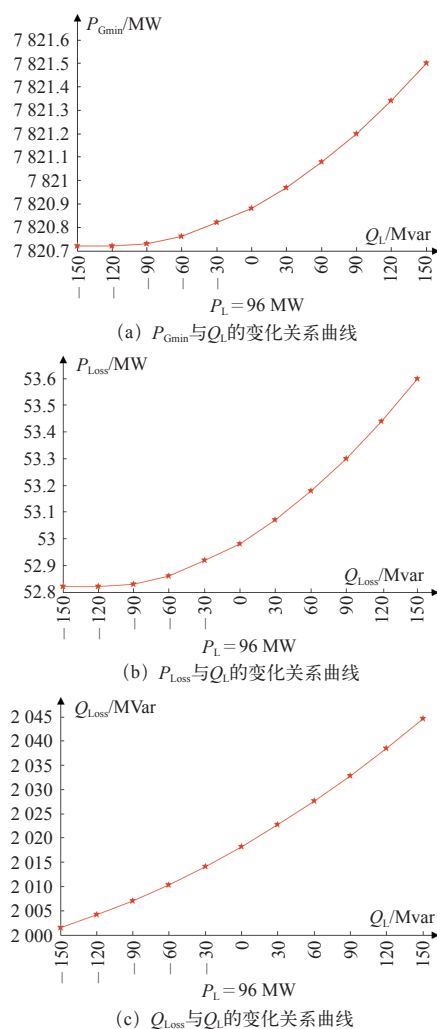
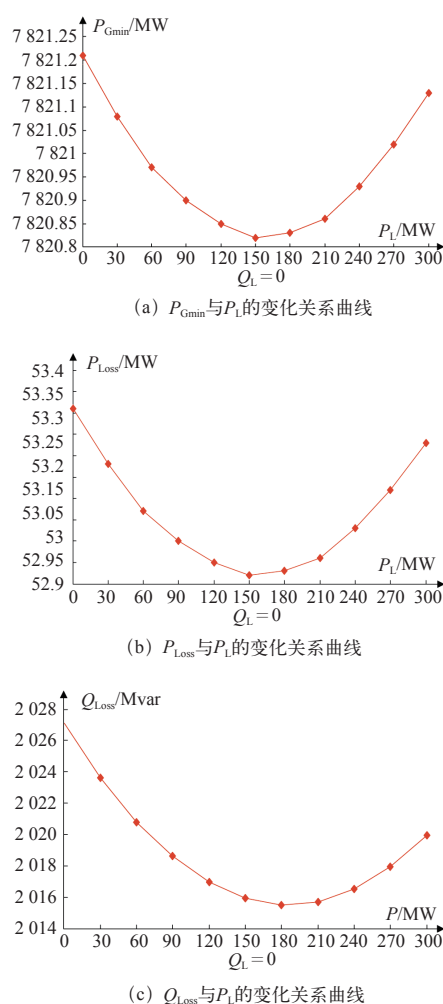


图8 P_{Gmin} 、 P_{Loss} 和 Q_{Loss} 与 Q_L 的变化关系曲线

阻抗标幺值越高, 因此线路有功、无功总网损增大; 整个系统总负荷一定, 所以发电机有功出力与线路有功总网损的变化趋势相同。

其次, 研究UPFC有功功率 P_L 的变化对于 P_{Gmin} 、 P_{Loss} 和 Q_{Loss} 的影响规律。当 Q_L 一定时, P_{Gmin} 、 P_{Loss} 和 Q_{Loss} 随 P_L 的关系变化曲线如图9所示。

由图9可得出, 当 Q_L 一定时, P_{Gmin} 、 P_{Loss} 和 Q_{Loss} 随着 P_L 的增大曲线呈现出先下降后上升的变化趋势。其中, Q_{Loss} 变化幅度最为明显, 而 P_{Gmin} 和 P_{Loss} 幅度不大。图9中UPFC各功率控制工况下, 南京网10台机组无功出力基本不变; 除了苏大唐1[#]机组和苏华金2[#]机组(平衡机)外, 其余8台机组全部达到有功出力上限, 这2台机组有功出力情况如图10所示。由图10可知, 随着 P_L 的增加, 2台发电机组有功出力先减小后增大, 出力之和在 $P_L =$

图9 P_{Gmin} 、 P_{Loss} 、 Q_{Loss} 和 P_L 的变化关系曲线

150 MW时最小；所以南京网10台机组有功出力总和也是先减小后增大，当 $P_L = 150$ MW时有功出力总和最小。由于系统总负荷一定，所以线路有功总网损的变化规律与发电机有功出力总和的变化情况相同。区别于线路有功总网损，在 $P_L = 180$ MW

时，线路无功总网损最小，主要是因为无功补偿装置的影响，其能够向系统动态提供一定程度的无功支持。

4 结束语

UPFC潮流调节功能等效为在系统中串接一个幅值和相角可连续调整的电压源，实现线路有功潮流和无功潮流的准确调节。本文主要针对中国第一台UPFC的强大的潮流控制特性展开综合性研究，分析计算出UPFC的潮流控制域，研究UPFC对整个南京西环网的潮流影响作用；建立了计及UPFC的OPF模型，分析了UPFC潮流控制域内调节功率的改变对于OPF计算结果的影响规律。通过本文研究，可得出如下结论：

1) 针对UPFC潮流调节功能，4个控制参数中，串联电压源相角是线路潮流的主要影响因素，另3个参数（并联电压源幅值、相角以及串联电压源幅值）对于线路潮流的影响贡献很小。

2) 南京UPFC工程，增强了南京网铁北—晓庄段的线路功率传输能力，明显改善了西环网主要输电通道潮流不均衡的状况，提升了主要负荷中心容量上限，有效解决了220 kV晓庄南送下关、中央门断面潮流过重的问题。南京UPFC工程可在西环网未来发展过程中满足负荷发展需求，具有积极的经济效益和社会效益。

3) 考虑UPFC潮流控制域的电力系统最优潮流。当UPFC调节线路有功恒定不变时，随其调节线路无功的增加，发电机最小有功出力、线路功

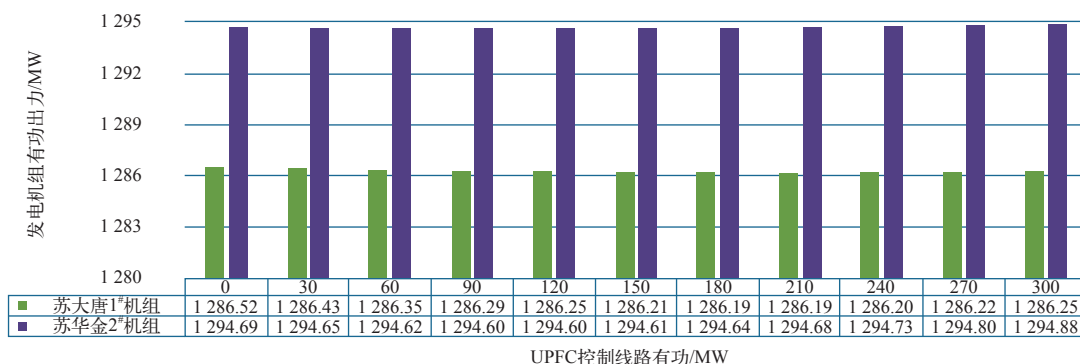


图10 发电机组有功出力

率总网损呈现先减小后增大的趋势；当UPFC调节线路无功一定时，随其调节线路有功的增加，发电机最小有功出力、线路功率总网损则不断增大；相比于发电机最小有功出力以及线路有功总网损，线路无功总网损的变化更加显著。

下一步研究方向为考虑UPFC潮流控制域的电力系统多目标最优潮流优化算法研究。

参考文献

- [1] Gyugyi L. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems [C]. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, 1995, 139 (4) : 323-331.
- [2] Renz B A, et al. AEP unified power flow controller performance [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14 (2) : 1374-1381.
- [3] Choo J B, Yoon J S, Chang B H, et al. Development of FACTS operation technology to the KEPCO power network-detailed EMTDC model of 80 MVA UPFC [C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002; Asia Pacific, IEEE/PES, 2002 (1) : 354-358.
- [4] Fardanesh B, Schuff A. Dynamic studies of the NYS transmission system with the Marcy CSC in the UPFC and IPFC configurations [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, 2003 (3) : 1126-1130.
- [5] 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) : 67-75.
- [6] 周玲, 王宽, 钱科军, 等. 计及UPFC的电力系统无功优化 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (4) : 37-41.
- [7] 王韶, 刘光时, 邹青林. 计及UPFC的电力系统多目标无功优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (8) : 95-100.
- [8] 占勇, 李光熹, 刘志超, 等. 计及FACTS装置的最大输电能力研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (5) : 23-26.
- [9] 李国庆, 赵钰婷, 王利猛. 计及统一潮流控制器的可用输电能力的计算 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (9) : 44-49.
- [10] 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.
- [11] 叶鹏, 宋家骅. 基于非线性内点方法的含有串联柔性输电系统装置的阻塞调度 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8) : 60-65.
- [12] 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.
- [13] 王旭, 祁万春, 黄俊辉, 等. 柔性交流输电技术在江苏电网中的应用 [J]. 电力建设, 2014, 35 (11) : 92-96.
- [14] 刘前进, 孙元章, 黎雄, 等. UPFC潮流控制与优化的研究 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (18) : 23-26.
- [15] Palma-Behnke R, Vargas L S, Perez J R, et al. OPF with SVC and UPFC modeling for longitudinal systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (4) : 1742-1753.
- [16] Nabavi-Niaki A, Iravani M R. Steady-state and dynamic models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for power system studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11 (4) : 1937-1943.
- [17] 胡晓波. 镇定电力系统多模态振荡的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [18] Granville S. Optimal reactive dispatch through interior point methods [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (1) : 136-146.
- [19] Clements K A, Davis P W, Frey K D. Treatment of inequality constraints in power system state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (2) : 567-574.
- [20] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(收稿日期: 2016-03-02) **EA**