

# 基于初值估算和潮流可控范围的 UPFC 潮流收敛特性研究

李生虎<sup>1</sup>,汪 婷<sup>1</sup>,吴 东<sup>2</sup>,张 浩<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009;2. 国网天津市电力公司检修公司,天津 300232)

**摘要:**变流器电压初值不合理或潮流设定值过大,将导致含统一潮流控制器(UPFC)电网潮流收敛到实际不可行解,或超过串联变流器的电压约束范围。提出基于初值估算的两阶段潮流算法,根据第一阶段常规潮流结果估算串联变流器电压相角,将其作为第二阶段潮流初值,解决了潮流收敛性对变流器电压初值敏感的问题。利用拓展雅可比矩阵,建立 UPFC 串联控制变量对潮流控制目标可调范围的灵敏度模型,量化串联变流器电压对潮流控制范围的影响,避免因控制目标不合理引起潮流发散或串联变流器电压越限。算例结果验证了所提算法的可行性和正确性。

**关键词:**统一潮流控制器;两阶段潮流算法;收敛特性;初值估算;灵敏度分析

**中图分类号:**TM 761

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.010

## 0 引言

作为一种柔性交流输电装置,统一潮流控制器 UPFC(Unified Power Flow Controller)在美国、韩国和中国得到越来越多的应用<sup>[1-4]</sup>。UPFC 综合可控串补和可控并补的优点,同时调节母线电压和线路潮流,从而可改善电网潮流分布,提高系统可靠性<sup>[5-6]</sup>。

精确潮流建模是 UPFC 参与电网安全运行控制的前提。文献[7-10]将电网与 UPFC 变量分开,无需考虑其初值,但是忽略了 UPFC 结构和控制特性,实用价值有限。文献[11]采用最优潮流模型,建立目标函数对 UPFC 变量的灵敏度,基于灵敏度更新 UPFC 变量,将优化和潮流计算迭代求解,计算量较大,且 UPFC 采用功率注入模型,过于简化。文献[12]将 UPFC 控制目标和电网潮流约束统一迭代,控制线路有功、无功和节点电压任意组合,算法较为实用。相比独立串补和并补装置,UPFC 的结构和控制较为复杂,其潮流收敛性较差,原因如下。

**a.** 对变流器电压初值敏感。由于 UPFC 串联等效成电压源相角范围为  $0 \sim 2\pi$ ,会使收敛性变差<sup>[13]</sup>。文献[12]根据 UPFC 控制目标对变量初始化,但是串联变流器电压相角初值的选取可能使得潮流收敛到实际不可行解。目前还未发现文献提出实用公式或经验值来选择 UPFC 变量初值。

**b.** UPFC 潮流目标不合理。考虑到电网安全和变流器容量有限,当受控线路潮流设置过大时,实际不能实现控制目标,潮流解发散,或者串联变流器电压超过允许上限。因此需要基于给定运行方式,确定潮流可调范围。文献[14-15]求解 UPFC 的潮流控制范围是一个圆域,圆心是加入 UPFC 前受控线

路潮流,半径与串联电压幅值最大值、受控线路受端节点电压成正比,与其电抗成反比。但前提条件是受控线路两端电压幅值不变,忽略了控制目标对潮流分布的影响<sup>[16]</sup>。如何根据变流器容量和实际运行场景量化 UPFC 潮流控制范围并引入潮流约束,未见相关文献详细阐述。

本文提出基于初值预估的两阶段潮流算法,任取变量初值进行常规潮流计算,对所得 UPFC 串联变流器电压相角进行估算,将其作为第二阶段潮流初值,以解决变量初值敏感问题。然后利用拓展雅可比矩阵建立 UPFC 串联控制变量对潮流控制目标可调范围的灵敏度模型,以量化串联变流器电压对潮流控制范围的影响,避免因潮流目标值设置不合理引起潮流发散或串联变流器电压超出上限。以 IEEE 14 节点系统为例,验证了所提算法的正确性。

## 1 基于初值预估的两阶段潮流算法

### 1.1 UPFC 潮流约束

如图 1 所示,在线路  $i-n$  始端加入 UPFC,其中  $V_i$ 、 $V_n$  分别为两端电压; $V_m$  为新增节点  $m$  电压; $I_{se}$ 、 $I_{sh}$  分别为串联和并联支路电流; $y_{se} = g_{se} + jb_{se}$ 、 $y_{sh} = g_{sh} + jb_{sh}$  分别为串联和并联变流器导纳; $V_{se} = V_{se} \angle \theta_{se}$ 、 $V_{sh} = V_{sh} \angle \theta_{sh}$  分别为串联和并联变流器电压; $\tilde{S}_{ref} = P_{ref} + jQ_{ref}$  为串联变流器潮流控制目标;下标 se、sh 分别表示串联和并联变流器。

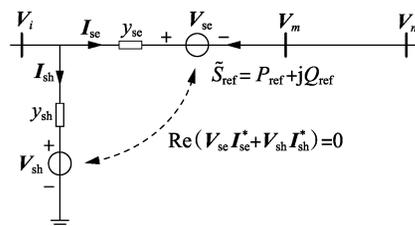


图 1 UPFC 等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of UPFC

收稿日期:2018-05-29;修回日期:2018-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877061)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877061)

串联变流器控制线路潮流,并联变流器维持直流支路有功平衡,控制节点*i*电压,节点*i*为PQV类型。新增潮流约束方程有:

$$\Delta \tilde{S}_{\text{ref}} = \tilde{S}_{\text{ref}} - \tilde{S}_{mi} = V_m (V_m + V_{se} - V_i)^* y_{se}^* = 0 \quad (1)$$

$$\text{Re}(V_{se} I_{se}^*) + \text{Re}(V_{sh} I_{sh}^*) = 0 \quad (2)$$

$$\Delta Q_i = \text{Im}(\tilde{S}_{Gi} - \tilde{S}_{Li} - \tilde{S}_i + y_{se}^* V_i V_{se}^* + y_{sh}^* V_i V_{sh}^*) = 0 \quad (3)$$

其中,上标“\*”表示共轭; $\tilde{S}_{mi}$ 为节点*m*流向节点*i*的功率; $\tilde{S}_{Gi}$ 、 $\tilde{S}_{Li}$ 分别为节点*i*发电量和负荷(可为0); $\tilde{S}_i$ 为节点*i*注入UPFC支路以外电网的功率。

## 1.2 串联变流器电压相角的估算

在常规潮流平电压启动的基础上,文献[12]给出了UPFC变量初值算法:

$$\theta_{se}^{(0)} = \arctan \frac{A_2 g_{se} + A_1 b_{se}}{A_2 b_{se} - A_1 g_{se}} \quad (4)$$

$$V_{se}^{(0)} = \frac{1}{V_m^{(0)}} \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2}{g_{se}^2 + b_{se}^2}} \quad (5)$$

$$V_{sh}^{(0)} = V_{\text{ref}} \quad (6)$$

$$\theta_{sh}^{(0)} = \arcsin \left( \frac{A_3}{V_i^{(0)} V_{sh}^{(0)} \sqrt{g_{se}^2 + b_{se}^2}} - \frac{g_{se}}{\sqrt{g_{se}^2 + b_{se}^2}} \right) \quad (7)$$

$$\begin{cases} A_1 = P_{\text{ref}} - g_{se} V_m^{(0)} (V_m^{(0)} - V_i^{(0)}) \\ A_2 = Q_{\text{ref}} + b_{se} V_m^{(0)} (V_m^{(0)} - V_i^{(0)}) \\ A_3 = g_{se} V_{se}^{(0)2} + g_{sh} V_{sh}^{(0)2} + \\ (V_m^{(0)} - V_i^{(0)}) (g_{se} \cos \theta_{se}^{(0)} + b_{se} \sin \theta_{se}^{(0)}) \end{cases} \quad (8)$$

其中,上标(0)表示初值; $V_{\text{ref}}$ 为并联变流器控制目标。

以电压 $V_i$ 为圆心,在 $V_{se,\min}$ 和 $V_{se,\max}$ 之间调节 $V_{se}$ ,从而控制该线路潮流。当改变潮流控制目标时,串联电压相角变化明显,且呈圆周变化趋势。但是当改变有功设定值时,由式(4)求出的 $\theta_{se}^{(0)}$ 不变,因为忽略UPFC变流器电阻损耗, $Q_{\text{ref}}$ 、 $V_{\text{ref}}$ 和 $b_{se}$ 的选取恰好使分母为0,此时 $\theta_{se}^{(0)}$ 总是趋于 $\pi/2$ 或 $-\pi/2$ ,导致串联电压相角初值误差太大,使得潮流收敛性差。

$\theta_{se}$ 可能取值情况如图2所示。在 $[-\pi, \pi]$ 周期内会出现2次 $\sin \theta_{se}$ 、 $\cos \theta_{se}$ 数值相等但符号相反的情况,如图2中的①和②。假设①处相角为 $\theta_{se}$ ,对

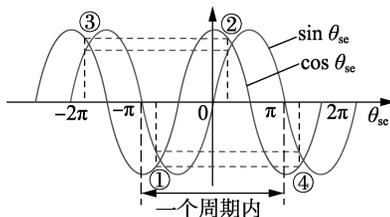


图2 串联电压相角可能解

Fig.2 Possible solutions of  $\theta_{se}$

应 $V_{se} > 0$ ,将②处 $\theta_{se} + \pi$ 代入式(9),可得 $V_{se} < 0$ ,该结果不符合实际运行情况。需要说明的是,式中除串联电压外,其他电压相角、幅值均不变。

$$\Delta P_{\text{ref}} = P_{\text{ref}} - V_m^2 g_{se} + V_m V_i (g_{se} \cos \theta_{mi} + b_{se} \sin \theta_{mi}) - V_m V_{se} (g_{se} \cos \theta_{mse} + b_{se} \sin \theta_{mse}) = 0 \quad (9)$$

其中, $\theta_{mi} = \theta_m - \theta_i$ , $\theta_{mse} = \theta_m - \theta_{se}$ 。

若正确解在①处,而初值接近 $\pi/2$ ,与①相比较,②更接近所求初值,迭代后潮流结果可能误收敛于幅值小于0的②处,实际不可行。另外,三角函数具有周期性,当 $\theta_{se}$ 初值与正确解相差较大,甚至可能收敛于③、④处,相角在区间 $[-\pi, \pi]$ 以外。

将 $\theta_{se}$ 结果分成3类如表1所示,其中*k*为整数。由此可对 $\theta_{se}$ 进行估算。对于第2或3类结果,可将相角进行 $2k\pi$ 或 $(2k+1)\pi$ 相位变换,直到满足相角约束,变换后的相角就是在该潮流控制目标下串联变流器所需要调整的电压相角。

表1 串联电压相角分类

Table 1 Classification of  $\theta_{se}$

分类	$\theta_{se}$	$V_{se}$
第1类	① $\theta_{se,\min} \leq \theta_{se} \leq \theta_{se,\max}$	$> 0$
第2类	④ 与①处相差 $2k\pi$	$> 0$
第3类	②③ 与①处相差 $(2k+1)\pi$	$< 0$

## 1.3 基于初值预估的两阶段潮流算法

受控线路潮流调整与电网网络结构、线路位置有关,无法直接给出潮流控制目标值与串联电压的解析表达式,需要常规潮流才能估算串联电压,因此提出基于初值预估的两阶段潮流算法,如图3所示,包括以下步骤。

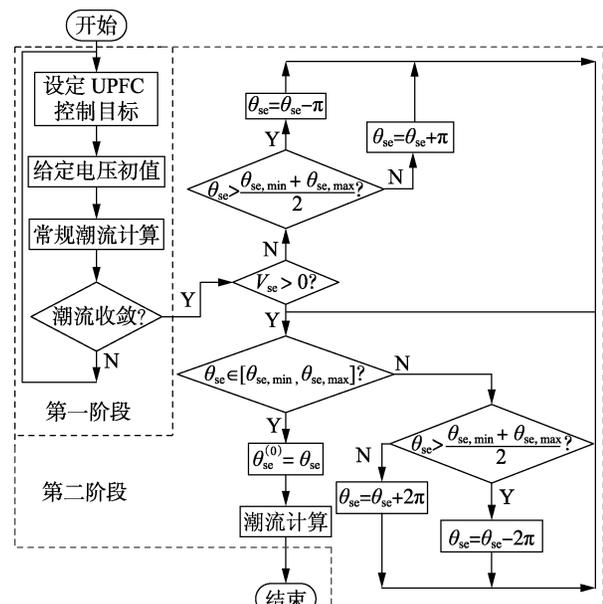


图3 两阶段潮流算法流程

Fig.3 Flowchart of two-stage power flow algorithm

a. 确定 UPFC 控制目标设定值。

b. 节点电压初值按平电压启动,在 UPFC 串联电压相角取值范围内,任意设定初值  $\theta_{se}^{(0)}$  或根据式 (4) 计算;根据式 (5) — (7) 获得串联电压幅值初值  $V_{se}^{(0)}$  以及并联电压初值  $V_{sh}^{(0)}$ 、 $\theta_{sh}^{(0)}$ 。

c. 统一求解潮流,若收敛,则转步骤 d; 否则返回步骤 a, 调整潮流控制目标。

d. 若串联电压幅值  $V_{se} > 0$ , 则转步骤 e; 否则, 转步骤 f。

e. 判断  $\theta_{se}$  是否在取值范围内,若是转步骤 g; 否则,令  $\theta_{se} = \theta_{se} + 2k\pi$ , 直到满足相角约束,转步骤 g。

f. 令  $\theta_{se} = \theta_{se} + (2k+1)\pi$ , 直到  $\theta_{se}$  在取值范围内,转步骤 g。

g. 采用步骤 e 或步骤 f 处理的  $\theta_{se}$  更新初值  $\theta_{se}^{(0)}$ , 进行潮流计算。

## 2 基于灵敏度模型估计 UPFC 潮流控制范围

对可控串补、可控并补潮流灵敏度的研究<sup>[17-18]</sup>为量化 UPFC 潮流控制范围提供了参考思路。基于 UPFC 与电网联立的潮流方程,可基于拓展雅可比矩阵构造控制目标与受控参数的灵敏度。

将节点功率平衡方程  $f$ 、变流器约束方程  $h_{se}$  和  $h_{sh}$  简记为:

$$f(\mathbf{V}_{sys}, \mathbf{V}_{se}, \mathbf{V}_{sh}) = 0 \quad (10)$$

$$h_{se}(\mathbf{V}_{sys}, \mathbf{V}_{se}, \mathbf{V}_{sh}) = 0 \quad (11)$$

$$h_{sh}(\mathbf{V}_{sys}, \mathbf{V}_{se}, \mathbf{V}_{sh}) = 0 \quad (12)$$

其中,下标 sys 表示系统;  $\mathbf{V}_{sys}$  包括非平衡节点电压相角和 PQ 节点电压幅值。将式 (10) — (12) 线性化:

$$\begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta h_{se} \\ \Delta h_{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{sys} & \mathbf{J}_{sys,se} & \mathbf{J}_{sys,sh} \\ \mathbf{J}_{se,sys} & \mathbf{J}_{se} & \mathbf{J}_{se,sh} \\ \mathbf{J}_{sh,sys} & \mathbf{J}_{sh,se} & \mathbf{J}_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_{sys} \\ \Delta \mathbf{V}_{se} \\ \Delta \mathbf{V}_{sh} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{J}$  为雅可比矩阵。

潮流可调范围是受串联变流器电压  $\mathbf{V}_{se}$  控制的,为了量化  $\Delta \mathbf{V}_{se}$  对  $\Delta h_{se}$  的影响,消去变量  $\Delta \mathbf{V}_{sys}$  和  $\Delta \mathbf{V}_{sh}$ 。由于负荷和发电机的响应比 UPFC 的控制动作慢,且串并联变流器与系统交换无功相互独立,因此令  $\Delta f = \Delta h_{sh} = 0$ , 由式 (13) 解出:

$$\Delta \mathbf{V}_{sys} = \frac{\partial \mathbf{V}_{sys}}{\partial \mathbf{V}_{se}} \Delta \mathbf{V}_{se} \quad (14)$$

$$\Delta \mathbf{V}_{sh} = \frac{\partial \mathbf{V}_{sh}}{\partial \mathbf{V}_{se}} \Delta \mathbf{V}_{se} \quad (15)$$

其中,  $\partial \mathbf{V}_{sys} / \partial \mathbf{V}_{se}$ 、 $\partial \mathbf{V}_{sh} / \partial \mathbf{V}_{se}$  分别为节点电压、并联电压对串联电压的灵敏度矩阵,分别如式 (16)、(17) 所示。

$$\frac{\partial \mathbf{V}_{sys}}{\partial \mathbf{V}_{se}} = (\mathbf{J}_{sys} - \mathbf{J}_{sys,sh} \mathbf{J}_{sh}^{-1} \mathbf{J}_{sh,sys})^{-1} (-\mathbf{J}_{sys,se} + \mathbf{J}_{sys,sh} \mathbf{J}_{sh}^{-1} \mathbf{J}_{sh,se}) \quad (16)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_{sh}}{\partial \mathbf{V}_{se}} = (\mathbf{J}_{sh,sys} \mathbf{J}_{sys}^{-1} \mathbf{J}_{sys,sh} - \mathbf{J}_{sh})^{-1} (\mathbf{J}_{sh,se} - \mathbf{J}_{sh,sys} \mathbf{J}_{sys}^{-1} \mathbf{J}_{sys,se}) \quad (17)$$

将式 (14)、(15) 代入式 (13), 可得潮流控制范围  $\Delta h_{se}$  与串联电压可调范围  $\Delta \mathbf{V}_{se}$  的线性关系为:

$$\Delta h_{se} = \left( \mathbf{J}_{se,sys} \frac{\partial \mathbf{V}_{sys}}{\partial \mathbf{V}_{se}} + \mathbf{J}_{se,sh} \frac{\partial \mathbf{V}_{sh}}{\partial \mathbf{V}_{se}} + \mathbf{J}_{se} \right) \Delta \mathbf{V}_{se} = \mathbf{M} \Delta \mathbf{V}_{se} \quad (18)$$

其中,  $\mathbf{M}$  为灵敏度矩阵。

令受控线路有功设定值为  $P_{ref}$ , 无功设定值为  $Q_{ref}$ , 此时串联电压幅值为  $V_{se}$ , 相角为  $\theta_{se}$ 。UPFC 潮流调节能力强,  $V_{se}$  在较小范围内变化即可达到控制目标, 因此串联变流器潮流控制目标线性可调范围为:

$$\Delta h_{se, \min} = \mathbf{M} [\theta_{se} - \theta_{se, \min} \quad V_{se} - V_{se, \min}]^T \quad (19)$$

$$\Delta h_{se, \max} = \mathbf{M} [\theta_{se, \max} - \theta_{se} \quad V_{se, \max} - V_{se}]^T \quad (20)$$

## 3 算例分析

### 3.1 两阶段潮流算法的验证

以 IEEE 14 节点系统为例, UPFC 安装在线路 5-4 之间, 新增节点 15, 如图 4 所示。在加入 UPFC 前, 受控线路潮流  $\tilde{S}_{5-4} = 0.2272 + j0.0876$  p.u.。忽略变流器电阻损耗, 取变流器电抗  $X_{se} = X_{sh} = 0.1$  p.u., 并联变流器电压控制目标值为 1.05 p.u., 串联电压相角约束为  $\theta_{se, \min} = -\pi$ 、 $\theta_{se, \max} = \pi$ 。

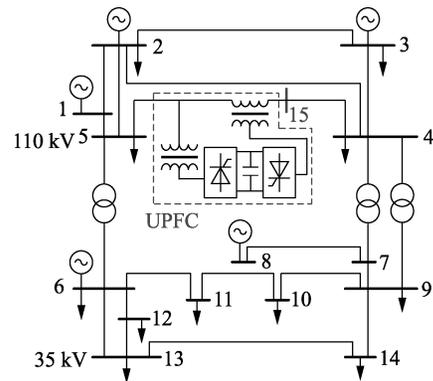
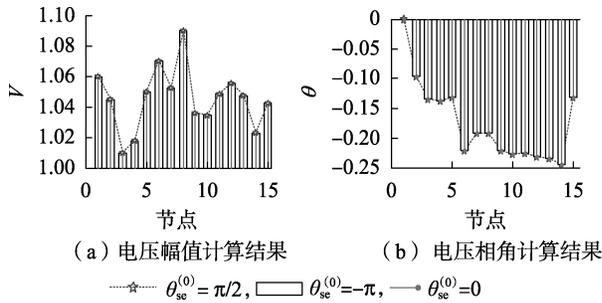


图 4 加装 UPFC 的 IEEE 14 节点系统

Fig.4 IEEE 14-bus system with UPFC

给定潮流控制目标  $\tilde{S}_{ref} = -(0.3 + j0.5)$  p.u., 在不同  $\theta_{se}$  初值下, 采用统一迭代算法, 求解节点电压和 UPFC 变量分别如图 5 (图中纵轴均为标幺值)、表 2 (表中电压均为标幺值) 所示。可见  $\theta_{se}$  初值变化不影响节点电压和并联电压结果, 只影响串联电压幅值和相角。由此验证了 1.2 节中估算  $\theta_{se}$  初值时假设节点电压、并联电压不变的合理性。

图5 不同  $\theta_{se}^{(0)}$  对节点电压影响Fig.5 Impact of different values of  $\theta_{se}^{(0)}$  on bus voltages表2 不同  $\theta_{se}^{(0)}$  下 UPFC 参数Table 2 UPFC parameters with different values of  $\theta_{se}^{(0)}$ 

$\theta_{se}^{(0)}/\text{rad}$	UPFC 变量			
	$V_{se}$	$\theta_{se}/\text{rad}$	$V_{sh}$	$\theta_{sh}/\text{rad}$
$\pi/2$	-0.049 1	0.469 6	1.144 1	-0.131 1
0	0.049 1	35.027 2	1.144 1	-0.131 1
$-\pi$	0.049 1	-2.672 0	1.144 1	-0.131 1

取收敛精度  $\delta = 10^{-8}$  p.u., 表3 给出在不同潮流控制目标下, 采用常规潮流和本文两阶段潮流算法的串联电压、迭代次数和计算时间(表中电压、功率均为标么值)。常规潮流所得电压幅值小于0时, 相角与正确解间相差  $\pi$ ; 电压幅值大于0时, 若对应相角超出  $[-\pi, \pi]$  范围, 其值与正确解之间相差  $2\pi$ 。而两阶段潮流算法电压幅值均大于0, 相角在  $[-\pi, \pi]$  范围内, 显然更加合理。

表3 两阶段潮流与常规潮流结果对比

Table 3 Results comparison between two-stage power flow and conventional power flow

算法	参数	参数值		
		$\tilde{S}_{ref} = -0.4-j0.5$	$\tilde{S}_{ref} = -0.16-j0.5$	$\tilde{S}_{ref} = -0.16-j0.27$
UPFC 变量初值	$\theta_{se}^{(0)}/\text{rad}$	1.570 8	1.570 8	-0.607 8
	$V_{se}^{(0)}$	0.040 0	0.016 0	0.028 0
	$\theta_{sh}^{(0)}/\text{rad}$	-0.001 8	-0.000 7	0.000 7
	$V_{sh}^{(0)}$	1.05	1.05	1.05
	$\theta_{se}/\text{rad}$	3.894 4	-0.401 8	-4.355 9
常规潮流	$V_{se}$	0.070 3	-0.035 7	-0.002 9
	迭代次数	9	9	8
	计算时间/s	0.135	0.047	0.053
	$\theta_{se}/\text{rad}$	-2.388 8	2.739 8	-1.214 3
两阶段潮流	$V_{se}$	0.070 3	0.035 7	0.002 9
	第二阶段迭代次数	5	6	6
	总迭代次数	14	15	14
	总计算时间/s	0.138	0.050	0.056

取  $Q_{ref} = -0.5$  p.u.,  $P_{ref}$  变化时, 由传统方法估算的相角初值却保持 1.570 8 rad 不变, 初值估算误差较大, 导致 9 次迭代后收敛。对比之下, 两阶段潮流算法的迭代次数更多, 是 2 次潮流计算导致的。但第二阶段经过 5~6 次迭代即可收敛, 表明经过对相角初值估算, 潮流收敛速度得到改善。

相比常规潮流, 两阶段潮流算法多了估算相角和第二阶段潮流计算, 总计算时间仅增加几毫秒, 不影响两阶段潮流算法的计算效率, 但计算结果更加准确, 对 UPFC 不同控制目标的适用性更好。

### 3.2 UPFC 潮流控制范围的比较

UPFC 容量与串联变流器持续运行允许电压和输电线路热稳定电流有关<sup>[19]</sup>。取串联变流器最大电压为 0.1 p.u., 当前潮流控制目标设为加入 UPFC 之前的线路潮流, 即  $\tilde{S}_{ref} = -(P_0 + jQ_0) = -\tilde{S}_{5-4}$ , 将本文灵敏度模型的潮流控制范围与现有方法<sup>[14-15]</sup> 进行比较, 如图6 所示(图中横轴、纵轴均为标么值), 图中矩形  $a_1b_1c_1d_1$ 、 $a_2b_2c_2d_2$ 、 $a_3b_3c_3d_3$  分别为串联变流器电压幅值变化、相角变化、相角和幅值同时变化时线性化的潮流控制范围。潮流控制区域边界点对应的串联电压幅值, 如表4 所示(表中数据均为标么值)。

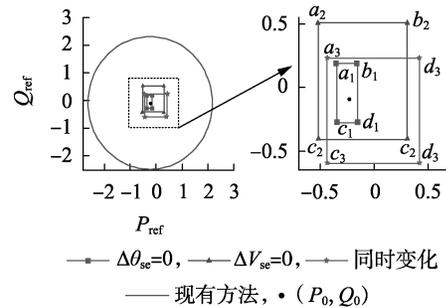


图6 不同方法下潮流控制范围对比

Fig.6 Comparison of power flow controllable ranges among different methods

表4 控制范围边界值及其串联电压幅值

Table 4 Boundary values of controllable ranges and corresponding series voltage magnitudes

区域	边界点	$(P_{ref}, Q_{ref})$	$V_{se}$	$\varepsilon$
$a_1b_1c_1d_1$	$a_1$	(-0.340 1, 0.192 0)	0.100 4	0.000 4
	$b_1$	(-0.150 5, 0.192 0)	0.080 7	
	$c_1$	(-0.340 1, -0.277 6)	0.050 5	
	$d_1$	(-0.150 5, -0.277 6)	0.000 7	
$a_2b_2c_2d_2$	$a_2$	(-0.516 3, 0.512 0)	0.177 6	0.079 4
	$b_2$	(0.311 4, 0.512 0)	0.179 4	
	$c_2$	(-0.516 3, -0.409 5)	0.096 3	
	$d_2$	(0.311 4, -0.409 5)	0.131 5	
$a_3b_3c_3d_3$	$a_3$	(-0.439 6, 0.232 4)	0.123 7	0.073 7
	$b_3$	(0.424 3, 0.232 4)	0.173 0	
	$c_3$	(-0.439 6, -0.599 4)	0.085 5	
	$d_3$	(0.424 3, -0.599 4)	0.173 7	
圆	—	(-2.619 5, -0.087 6)	0.639 0	0.582 7
	—	(2.165 1, -0.087 6)	0.682 7	
	—	(-0.227 2, -2.479 9)	0.326 2	
	—	(-0.227 2, 2.304 7)	0.536 3	

注:  $\varepsilon$  表示各个区域边界点求出的串联电压最大值超出  $V_{se, \max}$  的量。

由图6 和表4 可看出, 现有方法比灵敏度模型所求出的控制范围大, 且圆形控制范围边界点  $V_{se}$  远超最大电压, 原因在于现有方法忽略了 UPFC 加入对节点电压的影响, 随着 UPFC 容量增大, 对电网影

响越大,现有方法所求控制范围的误差越大,甚至潮流发散,如表 5 所示(表中数据均为标么值)。而对于灵敏度模型的控制区域,若仅考虑电压幅值变化,矩形  $a_1b_1c_1d_1$  误差最小,若考虑相角变化,矩形  $a_2b_2c_2d_2$  和  $a_3b_3c_3d_3$  边界点的  $V_{se}$  幅值超出最大值,但误差较小。其原因主要在于截断误差,串联电压相角可在一个圆周内变化,导致线性化潮流控制范围误差稍大,对此问题,可采用分段线性模型求解。

表 5  $V_{se,max}=0.2$  p.u. 时圆域边界点的串联电压幅值  
Table 5 Series voltage magnitudes of circle boundary with  $V_{se,max}=0.2$  p.u.

$(P_{ref}, Q_{ref})$	$V_{se}$	$\varepsilon$
(-5.011 8, -0.087 6)	1.213 2	
(4.557 4, -0.087 6)	发散	1.013 2
(-0.227 2, -4.872 2)	发散	
(-0.227 2, 2.304 7)	0.635 2	

图 7 给出了  $V_{se,max}=0.1$  p.u. 时,潮流控制目标在矩形  $a_1b_1c_1d_1$  内变化串联电压幅值(图中横轴、纵轴均为标么值)。从三者关系  $P_{ref}-V_{se}$  和  $Q_{ref}-V_{se}$  可看出,可行域内任意潮流控制目标值对应的  $V_{se}$  均没有超过 0.1 p.u.,从而证明了基于灵敏度模型所量化的潮流控制范围能保证潮流结果不超出串联电压约束。考虑到 UPFC 串联变流器可在圆周内任意调整电压相位,应用灵敏度模型时,可只考虑幅值变化对潮流控制范围的影响。

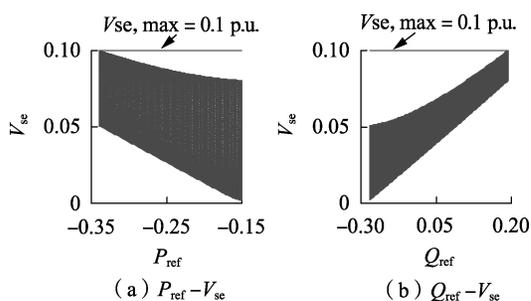


图 7 潮流设定值在  $a_1b_1c_1d_1$  内对应的  $V_{se}$

Fig.7  $V_{se}$  corresponding to power setting in area  $a_1b_1c_1d_1$

## 4 结论

本文针对含 UPFC 电网,提出基于初值估计的两阶段潮流算法,改善潮流收敛性;建立灵敏度模型,量化 UPFC 潮流控制范围,得到如下结论。

a. 在潮流控制目标一定的情况下,UPFC 串联电压相角初值的选取仅影响串联电压,不影响节点电压和并联电压。

b. 当潮流得到的串联电压幅值为正数时,对应的串联电压相角与正确解相差  $\pi$  的偶数倍;当电压幅值为负数时,对应电压相角与其解相差  $\pi$  的奇数倍。基于此现象估算串联电压相角,将估算结果作为潮流初值,避免了潮流收敛性对变流器电压初值

的依赖。

c. 采用灵敏度模型得到的潮流控制范围比圆域的误差要小,其中只考虑串联电压幅值变化的误差最小。由于 UPFC 变流器串联电压相位可在圆周内任意调整,潮流调节能力强,故灵敏度模型线性化潮流控制范围时只考虑串联电压幅值的变化,即可保证线性化区域内潮流设定值的潮流结果不超过串联变流器电压约束范围。

## 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: 14-22.
- [2] 和萍, 耿斯涵, 姚依林, 等. UPFC 改善含风电电力系统阻尼特性分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 208-213.  
HE Ping, GENG Sihan, YAO Yilin, et al. Analysis of damping characteristic improvement by UPFC for power system with wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 208-213.
- [3] 李鹏, 王玉婷, 高磊, 等. 统一潮流控制器串联变压器启动调试方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 68-73.  
LI Peng, WANG Yuting, GAO Lei, et al. Startup test method for series transformer of UPFC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 68-73.
- [4] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.  
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing western power grid [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
- [5] 钱臻, 刘建坤, 陈静, 等. 计及风电不确定性的含 UPFC 电力系统的两阶段最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 80-86.  
QIAN Zhen, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Two-stage OPF considering wind-power uncertainty for power system with UPFC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 80-86.
- [6] RAJABI-GHAHNAVIEH A, FOTUHI-FIRUZABAD M, SHAHIDEHPOUR M, et al. UPFC for enhancing power system reliability [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2881-2890.
- [7] 王毅, 董毅峰, 侯俊贤, 等. 基于模块化功率注入模型的含 UPFC 电力系统潮流算法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2537-2542.  
WANG Yi, DONG Yifeng, HOU Junxian, et al. Research on power flow algorithm of power system with UPFC based on modular power injection model [J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2537-2542.
- [8] 杨健, 宋鹏程, 徐政. 适用于新型 UPFC 拓扑的电力系统潮流计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 888-894.  
YANG Jian, SONG Pengcheng, XU Zheng. A load flow calculation method for power system with novel UPFC topology [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 888-894.
- [9] 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 Niwei, 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.
- [10] 马朋, 刘青, 邹家平, 等. UPFC 有功控制引起的交互影响研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 176-181.

- MA Peng, LIU Qing, ZOU Jiaping, et al. Research on interaction during active power-flow control of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):176-181.
- [11] FANG W L. Coordinated power control of unified power flow controller and its application for enhancing dynamic power system performance[D]. Hong Kong, China; the Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- [12] FUERTE-ESQUIREL C R, ACHA E, AMBRRIZ-PEREZ H, et al. A comprehensive Newton-Raphson UPFC model for the quadratic power flow solution of practical power networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1):102-109.
- [13] 童强, 彭建春. 一种新的含 UPFC 的电力系统潮流算法[J]. 继电器, 2006, 34(2):20-23.
- TONG Qiang, PENG Jianchun. A novel method for power flow calculation of power system with UPFC[J]. Relay, 2006, 34(2):20-23.
- [14] REN B, CAI H, DU W, et al. Analysis of power flow control capability of a unified power flow controller to be installed in a real Chinese power network[C]//Proceedings of IET International Conference. Beijing, China; IET, 2016:1-6.
- [15] 谭振龙, 张春朋, 姜齐荣, 等. 旋转潮流控制器与统一潮流控制器和 Sen Transformer 的对比[J]. 电网技术, 2016, 40(3):868-874.
- TAN Zhenlong, ZHANG Chunpeng, JIANG Qirong, et al. Comparative research on rotary power flow controller, unified power flow controller and Sen Transformer[J]. Power System Technology, 2016, 40(3):868-874.
- [16] 颜伟, 朱继忠, 孙洪波, 等. UPFC 的潮流控制与暂态稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12):57-61.
- YAN Wei, ZHU Jizhong, SUN Hongbo, et al. Study of power flow control and transient stability with UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12):57-61.
- [17] LI S, DING M, WANG J, et al. Voltage control capability of SVC with var dispatch and slope setting[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(5):818-825.
- [18] LI S. Power flow control effect with TCSC on operation margin of zone 3 impedance relays[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(9):998-1004.
- [19] 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.

#### 作者简介:



李生虎

李生虎(1974—),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术(E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn);

汪婷(1994—),女,安徽枞阳人,硕士研究生,研究方向为风电系统分析与控制(E-mail: tingwang@mail.hfut.edu.cn);

吴东(1972—),男,山东潍坊人,高级工程师,研究方向为输电系统分析与控制;

张浩(1996—),男,安徽无为,人,博士研究生,研究方向为风电系统分析与控制。

## Power flow convergence characteristic of UPFC based on initial value evaluation and controllable range of power flow

LI Shenghu<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>1</sup>, WU Dong<sup>2</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Maintenance Company of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300232, China)

**Abstract:** The unreasonable initial voltage of converter or too large setting value of power flow will cause the power flow of power system with UPFC(Unified Power Flow Controller) converge to infeasible solution or exceed the voltage constraint range of series converter. A two-stage power flow algorithm based on initial value estimation is proposed. The voltage phase angle of series converter is estimated according to the conventional power flow in the first stage, which is set as the initial power flow value of the second stage. It solves the problem that the convergence of power flow is sensitive to the initial value of converter voltage. The Jacobian matrix is extended to build the sensitivity model of the series control variable of UPFC to the controllable object range of power flow, which quantifies the impacts of the voltage of series converter on the controllable range and avoids the divergence of power flow or voltage violation of series converter caused by unreasonable control objects. The case results verify the feasibility and correctness of the proposed algorithm.

**Key words:** UPFC; two-stage power flow algorithm; convergence characteristic; initial value estimation; sensitivity analysis