

基于 PSASP 的 UPFC 自定义模型 在西南电网的应用仿真

韩连山¹, 王新宝¹, 李 建², 王 彪²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 采用功率注入法和电流注入法, 在 PSASP 下实现 UPFC 自定义潮流模型与暂稳模型搭建。给出了川渝断面 UPFC 安装容量与改变潮流分布的关系, 计算了川渝断面动态特性。计算结果表明, UPFC 对于改善川渝断面潮流分布有一定作用, 但是安装在功率输送通道上的 UPFC, 单位容量改变所安装通道的潮流不到 0.5 单位, 杠杆作用小。通过串并联侧控制, UPFC 对改善功率、电压振荡效果较明显。

关键词: 统一潮流控制器; 川渝断面; PSASP

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)02-0015-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.02.004

Application Simulation of Unified Power Flow Controller Model in Transmission Lines between Sichuan – Chongqing Province Based on PSASP

Han Lianshan¹, Wang Xinbao¹, Li Jian², Wang Biao²

(1. Nanjing Nari – relays Engineering Technique Co., Ltd., Nanjing 211102 Jiangsu, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Combined with UPFC equivalent model and power injection method or current injection method, the UPFC power flow model and the transient stability model are introduced by using PSASP custom function. The relationship between UPFC installation capacity and the change of tidal power in lines between Sichuan – Chongqing province is given. The dynamic characteristics of the lines between Sichuan and Chongqing, and the oscillation characteristics of transient energy are calculated. The results show that UPFC has a certain effect on improving the power distribution and suppressing the energy oscillation, but one unit capacity of UPFC can only change less than 0.5 units power of the lines with UPFC, the leverage effect is pool, so the required UPFC capacity is larger.

Key words: unified power flow controller (UPFC); lines between Sichuan – Chongqing; PSASP

0 引 言

川渝第三通道投运后, 西南电网将建成投运藏中联网工程、渝鄂背靠背工程, 使西南电网与外部电网异步联网运行, 电网结构发生较大变化。西南电网异步联网运行后, 川渝断面潮流分布不均现象仍然存在: 北通道潮流轻而南通道潮流重, 在个别方式下, 北通道甚至出现潮流反送。川渝断面潮流分布不均所带来问

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGTYHT/15-JS-191)

题, 是当前影响川电外送能力的主要因素。

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为一种典型的 FACTS 装置, 可以有效改善潮流分布, 所提研究即应用 UPFC 改变川渝断面潮流分布。文献[1]详细说明利用电力系统分析综合程序(PSASP)自定义程序进行 UPFC 建模的原理, 并利用节点电流注入法建立了 UPFC 的动态模型。文献[2]提出了一种基于节点电流注入法的改进 UPFC 潮流控制的新方法: 串联侧基于电流预测法实现对线路有功、无功功率的控制, 并联侧用注入无

功电流控制母线电压,最后建立 PSASP 仿真模型。

在注入功率、注入电流原理的基础上,利用 PSASP 用户自定义程序分别搭建了 UPFC 用于潮流与暂稳计算的潮流模型和暂稳模型。为了方便,利用 UPFC 动态切入方法改进了暂稳计算模型。以渝鄂背靠背、川渝三通道、川藏联网三项重点工程投产后的电网为研究对象,在典型控制方式下,研究 UPFC 不同安装容量、不同安装地点对改善断面潮流分布的效果;仿真计算 UPFC 在四川电网故障后的动态特性并对比分析 UPFC 抑制暂态扰动的效果。

1 UPFC 原理

UPFC 的主要工作原理是通过电力电子设备(换流器)及控制系统来改变串联变压器的输出电压相角及幅值,从而达到优化控制线路潮流及系统电压的目的。

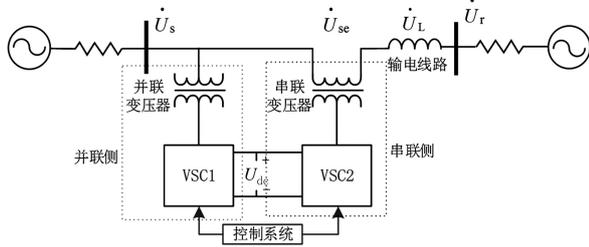


图1 UPFC 系统

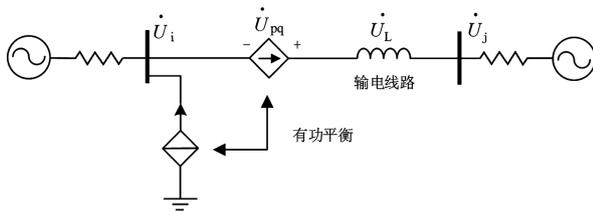


图2 UPFC 等值

UPFC 原理如图 1、图 2 所示。串联换流器向交流线路注入幅值和相位角均可控的电压矢量 \dot{U}_{se} , 实现潮流控制。并联侧类似于静止无功补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM), 下面主要介绍串联侧工作原理。

以两端无穷大系统为例分析 UPFC 串联部分的工作原理,其拓扑结构以及矢量如图 3 所示: $U_i \angle \delta$ 为线路首端电压; $U_j \angle 0$ 为线路末端电压; $U_{pq} \angle \theta$ 为 UPFC 注入的同步电压,其角度可以为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。线路等效电抗为 X_L (忽略线路电阻)。

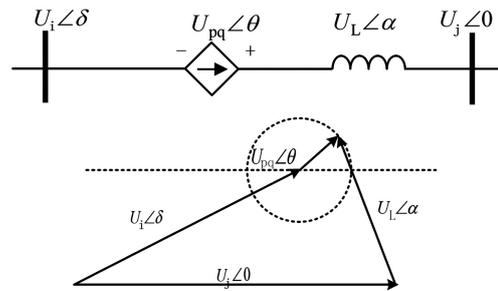


图3 UPFC 控制原理矢量

为简化分析模型,不考虑 UPFC 串并联部分的损耗。

2 UPFC 潮流模型及 PSASP 自定义实现

PSASP 潮流程序基于功率注入方法实现,含有线路模型的 UPFC 等效模型^[3-4]如图 4 所示。为便于调度控制,采用线路功率控制(组合调节)。

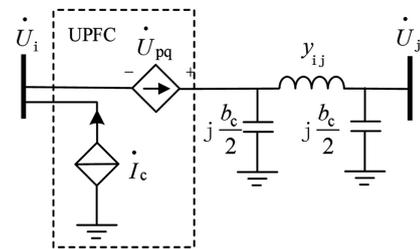


图4 含有线路的 UPFC 等效模型

根据功率注入法将图 4 模型改写为功率注入模型,如图 5 所示。

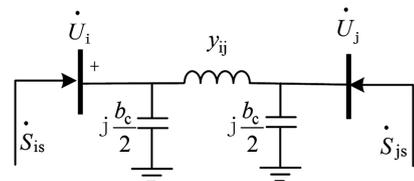


图5 含有线路的 UPFC 功率注入模型

根据功率注入法,含有 UPFC 潮流模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{S}_{is} = \dot{U}_i [I_c - \dot{U}_{pq}(y_{ij} + j b_c / 2)]^* \\ \dot{S}_{js} = \dot{U}_j (\dot{U}_{pq} y_{ij})^* \\ \dot{S}_{ji} = \dot{U}_j [(\dot{U}_j - \dot{U}_i) y_{ij} + j \dot{U}_j b_c / 2]^* \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{S}_{is} 表示 UPFC 对 i 节点的注入功率; \dot{S}_{js} 表示对 j 节点的注入功率; \dot{S}_{ji} 表示所在线路无 UPFC 影响时 j 侧的传输功率(由 j 流向 i)。

同时,在线路中 UPFC 所在支路还必须满足平衡条件:

$$\begin{cases} P_c + P_{pq} = 0 \\ \sum Q_{il} + Q_i + Q_{is} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据上述公式和平衡方程,可以得到 UPFC 功率控制潮流模型,输入参数为线路参数和线路期望控制功率。

3 UPFC 暂稳模型及 PSASP 自定义实现

UPFC 动态等值模型如图 6 所示。

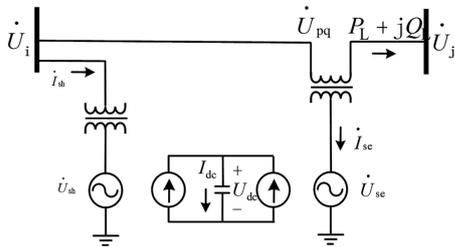


图 6 UPFC 动态等值电路模型

由于 UD 稳定模型与 PSASP 软件的接口为注入电流,这点与潮流模型有所不同,所以使用 UPFC 的注入电流模型,电流注入模型^[5]见图 7。

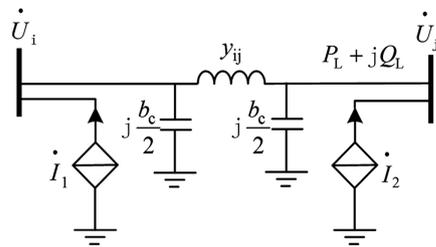


图 7 UPFC 注入电流模型

根据注入电流法, i, j 两节点的 UPFC 注入电流可分别用式(3)、式(4)表示:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_c - \dot{I}_{pq} \\ &= [I_x - U_{pqx}g_{ij} + U_{pqy}b_{ij} + U_{pqy}b_c/2] + \\ &\quad j[I_y - U_{pqy}g_{ij} - U_{pqx}b_{ij} - U_{pqx}b_c/2] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \dot{U}_{pq}y_{ij} \\ &= [U_{pqx}g_{ij} - U_{pqy}b_{ij}] + j[U_{pqy}g_{ij} + U_{pqx}b_{ij}] \end{aligned} \quad (4)$$

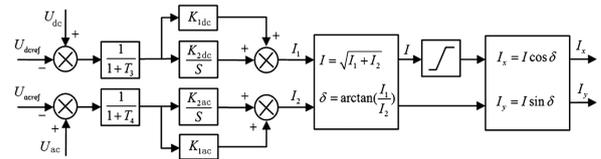
考虑直流侧电容器的充放电过程,还应满足以下关系:

$$\text{Re}[-\dot{U}_1 \dot{I}_c] - \text{Re}[\dot{U}_{pq} \dot{I}_{pq}] = CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \quad (5)$$

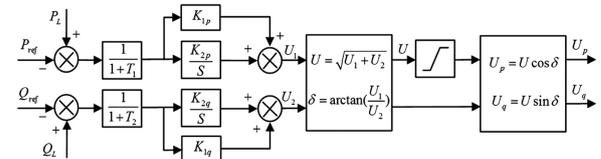
其中 $\dot{I}_c = I_x + jI_y$, $\dot{U}_{pq} = U_{pqx} + jU_{pqy}$ 。

串、并联侧控制采用 PI 控制进行解耦控制,其控制框图如图 8 所示。

通过图 8 中的控制后最终转换为式(3)、式(4)中的注入电流,实现 UPFC 暂态稳定控制。



(a) 并联侧控制



(b) 串联侧控制

图 8 UPFC 暂态串、并联侧控制

由于暂稳计算需要读取潮流计算结果,因存在小数截取误差以及初始化精度要求高,可能会导致初始化失败而无法进行暂稳仿真。因此在计算 UPFC 暂稳仿真时不采用暂稳初值计算方法。

为了避免暂态仿真失败,或者在进行暂态仿真时不搭建潮流模型,在式(3)、式(4)所述注入电流的基础上,乘上斜坡函数,斜坡函数初值为 0,终值为 1,其示意图如图 9 所示。

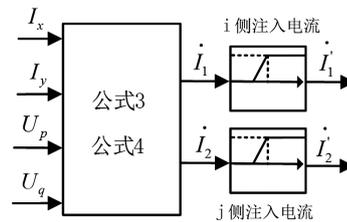


图 9 UPFC 暂态注入电流控制

这样 PSASP 软件在进行暂态仿真时,初始注入电流为 0,不影响暂态稳定计算初始化;在暂态计算开始后的,通过斜坡函数将 UPFC 注入电流注入系统即可。

4 UPFC 在西南电网的应用

西南电网四川侧将省内大量清洁能源通过川渝通道送到重庆或者经重庆送入华中电网。

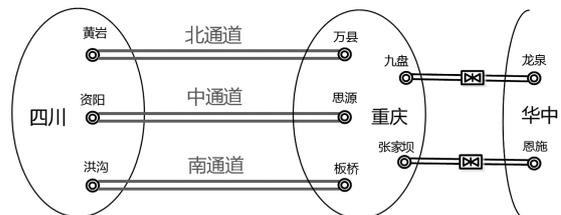


图 10 西南电网 2018 年年底川渝通道电网结构
然而,中通道投运后,南北通道潮流分布不均的

问题仍然存在,极端方式下北通道甚至倒送功率。典型丰大方式下,川电外送 6500 MW,川渝断面潮流分布如表 1 所示。

表 1 丰大方式下川渝断面功率分布

通道名称	有功功率(渝侧)/MW
黄万双线	446.402
资铜双线	2 478.158
洪板双线	3 465.342

4.1 UPFC 容量及杠杆效应计算

基于 PSASP 软件自定义潮流模型,对渝鄂背靠背投运后川渝断面四川侧安装 UPFC 的容量及杠杆效应进行计算,计算数据采用 2018 年丰大规划数据。功率基准值采用 100 MVA,基准电压采用 525 kV。

考虑增加 UPFC 后潮流转移导致三通道无功变化,模型中并联无功功率不设上限(或者通过人工投退电容器实现)。串联变压器的容量是限制 UPFC 容量的首要制约因素,模型中设置串联变压器电压限幅 0.2 p.u.。

1) 黄万双线安装 UPFC

黄万双线初始潮流为 446.4 MW,UPFC 额定电流按照 2 kA 选取,在不同的控制功率(通道末端功率)下,在四川侧安装 UPFC 基础上,对北通道(黄万双线) UPFC 串联变压器电压幅值、相角以及容量进行计算,计算结果如表 2 所示。

表 2 黄万 UPFC 不同线路控制功率下串联电压、功率

目标功率	相角 /rad	V_{pq} / (p.u.)	单串变功率 / (p.u.)
1.00	4.480 1	0.135 9	2.471 6
2.00	4.369 6	0.101 0	1.837 0
3.00	4.159 4	0.068 2	1.240 0
4.00	3.656 6	0.042 3	0.769 6
5.00	2.727 8	0.040 5	0.735 8
6.00	2.171 5	0.064 5	1.172 4
7.00	1.943 0	0.096 4	1.753 0
8.00	1.824 7	0.130 8	2.379 6
9.00	1.751 3	0.166 4	3.025 6
10.00	1.701 4	0.200 0	3.637 2

从图 11、图 12 可以看出,在增加或者减少线路潮流时,UPFC 功率近似与控制功率呈现线性关系。

黄万线 UPFC 的布置按照两串一并的配置原

则,并联侧容量按照串联侧容量计算,则 UPFC 改变黄万双线功率与 UPFC 容量比例关系(杠杆比)如表 3 所示。

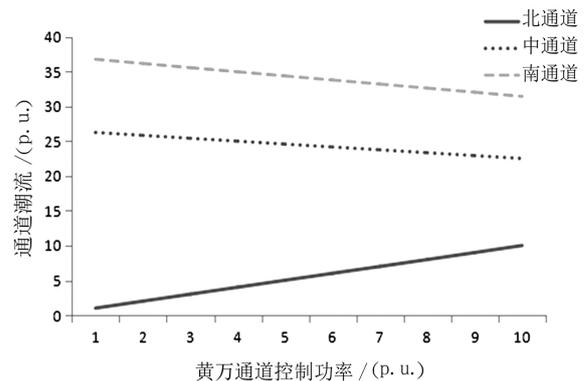


图 11 黄万 UPFC 不同控制功率对川渝断面潮流改善情况

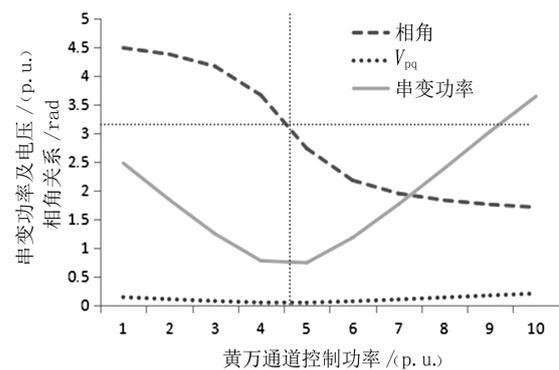


图 12 黄万不同线路控制功率下串联电压、功率关系

表 3 黄万双线 UPFC 杠杆比

黄万双线改变功率 / (p.u.)	UPFC 装置功率 / (p.u.)	杠杆比 K
0.551	2.207 3	0.249 6
1.544	3.517 2	0.439 0
2.527	5.259 0	0.480 5
3.519	7.138 7	0.492 9
4.518	9.076 9	0.497 7
5.535	10.911 6	0.507 2

从计算结果可以看出,单位容量 UPFC 仅可改变黄万双线潮流不到 0.5 单位功率。

2) 洪板双线安装 UPFC

典型方式下,洪板双线潮流较重,其双线初始有功功率为 3 465.3 MW,黄万双线初始有功功率为 446.4 MW。UPFC 额定电流按照 3.5 kA 选取,在不同的控制功率(通道末端功率)下,对南通道(洪板双线) UPFC 串联变压器电压幅值、相角以及容量进行计算,计算结果如表 4 所示。

表4 洪板 UPFC 不同线路控制功率下
串联电压、功率计算结果

目标功率 /(p. u.)	相角 /rad	V_{pq} /(p. u.)	单串变功率 /(p. u.)
37	0.714 8	0.058 2	1.853 6
36	0.379 9	0.048 8	1.552 7
35	-0.043 5	0.046 9	1.491 7
34	-0.429 4	0.053 4	1.699 1
33	-0.700 0	0.066 0	2.099 7
32	-0.873 8	0.081 9	2.607 2
31	-0.987 2	0.099 7	3.173 0
30	-1.064 2	0.118 5	3.772 4
29	-1.118 7	0.138 0	4.393 0
28	-1.157 9	0.158 0	5.029 2
27	-1.187 2	0.178 4	5.676 4
26	-1.209 4	0.199 0	6.332 3

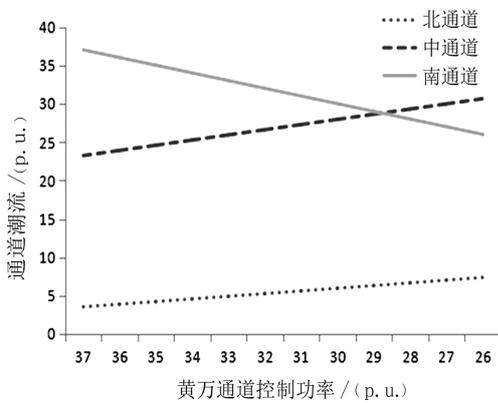


图13 洪板 UPFC 不同控制功率对川渝断面潮流改善情况

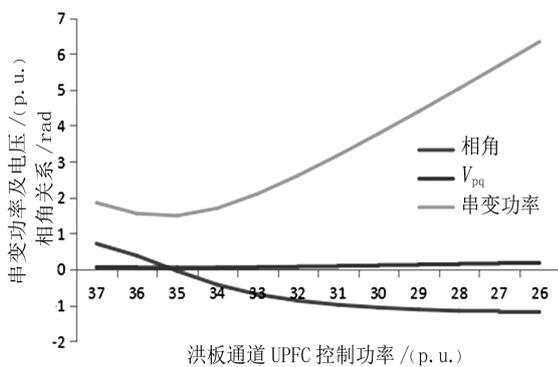


图14 洪板 UPFC 不同线路控制功率下串联电压、功率关系

同样按照两串一并的原则在洪板双线安装 UPFC 其效果如图 13、图 14 所示,洪板双线功率改变量与 UPFC 容量计算如表 5 所示。

从计算结果可以看出,单位容量 UPFC 仅可改变黄万双线潮流不到 0.4 单位功率,效果较差。

表5 洪板双线 UPFC 杠杆比

洪板双线功率改变 /(p. u.)	UPFC 装置功率 /(p. u.)	杠杆比 K
1.668	6.299 2	0.264 9
2.669	7.821 5	0.341 3
3.670	9.518 9	0.385 6
4.670	11.317 1	0.412 7
5.671	13.179 0	0.430 3
6.672	15.087 5	0.442 2
7.672	17.029 1	0.450 5
8.673	18.996 8	0.456 6

4.2 UPFC 动态特性仿真

以洪板双线洪沟侧安装 UPFC 为例,仿真动态模型采用动态切入式模型,暂稳仿真前川渝断面功率见表 1。仿真在 1 s 时投入 UPFC 模型并将洪板双线控制功率设置为 3000 MW。动态模型控制参数设置如下: $T_1 = 0.01$ $T_2 = 0.01$ $T_3 = 0.01$ $T_4 = 0.01$ $K_{1p} = 0.06$ $K_{2p} = 6$ $K_{1q} = 0.06$ $K_{2q} = 6$ $K_{1dc} = 3$ $K_{2dc} = 5$, $K_{1ac} = 50$ $K_{2ac} = 5$ 。

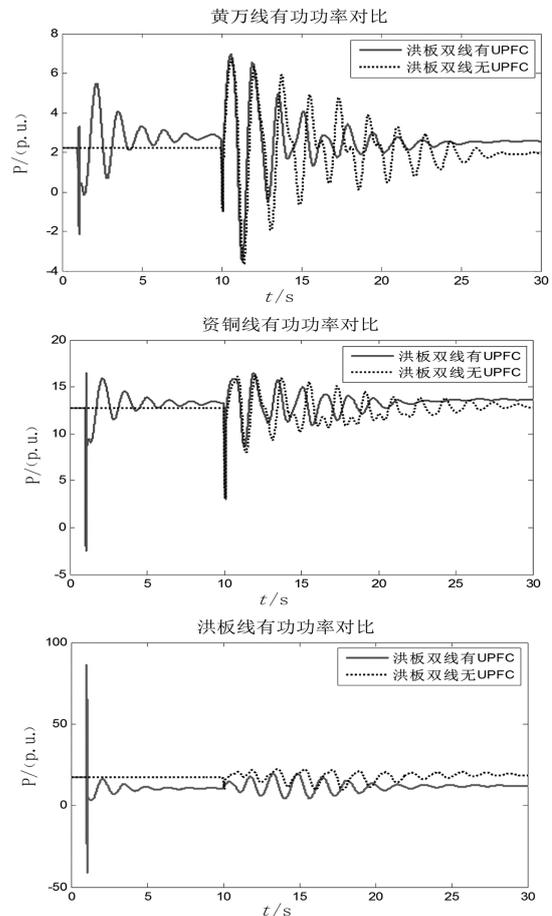


图15 洪板 UPFC 安装前后川渝断面功率变化对比

(下转第 94 页)

过分析二级风险指标可以有效判断在实际生产过程中风险性较强的方面,做到防范于未然,反映了所提出的热电联产综合评价模型的实用性。

参考文献

[1] 王振铭,郝刚.我国热电联产的现状、前景与建议[J].中国电力,2003,36(9):43-49.

[2] 龙虹毓,马建伟,吴锴,等.含热电联产和风电机组的电网节能调度[J].电力自动化设备,2011,31(11):18-22.

[3] 陈洁,杨秀,朱兰,等.基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):7-15.

[4] 陈建华,吴文传,张伯明,等.消纳大规模风电的热电联产机组滚动调度策略[J].电力系统自动化,2012,36(24):21-27.

[5] 崔杨,陈志,严干贵,等.基于含储热热电联产机组与

电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4072-4080.

[6] 郭佳欢,沈宏,黄伟.含小型冷热电联产的微电网系统经济运行[J].电网与清洁能源,2009,25(10):21-24.

[7] 孟安波,梅鹏,卢海明.基于纵横交叉算法的热电联产经济调度[J].电力系统保护与控制,2016,44(6):90-97.

[8] 何青,罗宁.燃气蒸汽联合循环热电联产机组热经济性分析[J].热力发电,2018,47(5):49-56.

[9] 魏兵,王志伟,李莉,等.微型燃气轮机冷热电联产系统经济性分析[J].热力发电,2007,36(9):1-5.

[10] 刘卫平,沙威,刘新利,等.评价热电联产机组经济性的节能比分析方法[J].中国电力,2010,43(9):41-44.

作者简介:

邱金鹏(1991),硕士,主要研究方向为电力技术经济。

(收稿日期:2018-12-19)

(上接第 19 页)

UPFC 投入进入稳态后,在 10 s 时发生尖山—彭祖 N-2 故障后川渝通道有功功率波动对比如图 15 所示。

5 结 语

结合 UPFC 等效模型以及功率注入法和电流注入法,详细介绍了利用 PSASP 自定义功能实现 UPFC 潮流模型与暂稳模型搭建过程;研究计算 UPFC 用于改善川渝断面潮流分布的可行性;详细计算川渝断面 UPFC 安装容量与改变潮流分布的关系;最后结合切入式暂稳模型,分析计算了川渝断面动态特性以及暂态能量的振荡特性。结果表明,安装在功率输送通道的 UPFC 对于改善川渝断面潮流分布有一定的作用,从计算结果可以看出,UPFC 单位容量改变所安装通道的潮流不到 0.5 单位,杠杆效应小,所需的 UPFC 容量较大。另外,由于 UPFC 串联侧控制可以对所安装线路功率进行动态控制,并联侧控制动态地补偿电压变化,UPFC 对抑制功率振荡方面有好的效果。

参考文献

[1] 张扬,毛雪雁,徐政.用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J].电网技术,2002,26(7):30-33.

[2] 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.

[3] 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,2006.

[4] 刘前进,孙元章,黎雄,宋永华,肖颖.基于功率注入法的 UPFC 潮流控制研究[J].清华大学学报(自然科学版),2001,41(3):55-58.

[5] Kannan S, Jayaram S, Salama M M A. Real and Reactive Power Coordination for A Unified Power Flow Controller[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3):1454-1461.

[6] 陈磊,王文婕,王茂海,等.利用暂态能量流的次同步强迫振荡扰动源定位及阻尼评估[J].电力系统自动化,2016,40(19):1-8.

作者简介:

韩连山(1986),工程师,主要研究方向为电力系统分析与控制;

王新宝(1978),高级工程师,主要研究方向为电力系统分析与控制;

李 建(1977),高级工程师,主要从事电力系统安全稳定运行管理工作;

王 彪(1977),高级工程师,主要研究方向为电力系统仿真与分析。

(收稿日期:2018-11-11)