

DOI: 10.7667/PSPC151728

UPFC 三节点功率注入模型及其工程应用

王海潜¹, 祁万春¹, 乔黎伟¹, 吴晨¹, 陈曦², 吴熙²

(1. 江苏省电力公司电力经济技术研究院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 实际工程中会出现 UPFC 并联侧换流变压器接入低电压等级母线的结构。对该结构的 UPFC 进行仿真分析时, 采用现有模型无法体现出 UPFC 对低压母线及与之相连的变电站、线路的影响。为解决上述问题, 提出了一种 UPFC 三节点功率注入模型, 并采用注入功率法, 推导了 UPFC 三节点功率注入模型的数学表达式。利用电力系统综合程序(PSASP)的用户自定义模型(UD)功能, 搭建了 UPFC 三节点功率注入模型。该模型将 UPFC 并联侧功率注入到低压母线上, 克服了现有模型无法体现 UPFC 对低压母线及与其相连变电站及线路影响的缺点。将其应用于采用该种 UPFC 接法的南京 UPFC 工程中进行仿真计算, 结果验证了该 UPFC 模型的精确性和可信度。

关键词: 功率注入法; 三节点模型; 南京 UPFC 工程; 统一潮流控制器; PSASP/UD

A three-bus power injection model of UPFC and its engineering application

WANG Haiqian¹, QI Wanchun¹, QIAO Liwei¹, WU Chen¹, CHEN Xi², WU Xi²

(1. Jiangsu Electric Power Company Economic Research Institute, Nanjing 210096, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In particular practical engineering application, the parallel side transformers of UPFC are integrated to the low voltage buses. Due to the special structure of UPFC, it is difficult to analyze the impact of UPFC on low voltage buses, neighboring substations and transmission lines with existing model. A three-bus power injection model of UPFC is proposed in this paper in order to solve this problem. Based on power injection method, the mathematical expression of a three-bus power injection model of UPFC is derived. A three-bus power injection simulation model is established by using the User Defined (UD) function of Power System Analysis Software Package (PSASP). In this model, the UPFC parallel power injects into the low voltage buses, which overcomes the limitation of existing model since they cannot reflect the impacts of UPFC on low voltage buses, connected substations and transmission lines. This three-bus power injection model has been put into practice successfully in the simulation of the Nanjing UPFC project. Simulation results reveal the accuracy and reliability of this UPFC model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407028) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20140633).

Key words: power injection method; three-bus model; Nanjing UPFC project; UPFC; PSASP/UD

0 引言

统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)作为功能最强大的柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)装置, 能同时对输电线路的电压、相角和阻抗进行实时调节, 其快速可靠的调节性能为电网控制提供了

新的手段^[1]。国内外对 UPFC 的理论研究十分丰富, 但真正投入运行的 UPFC 工程仅有文献[2]中提到的美国 Inez 工程与文献[3]中提到的美国 Marcy 工程以及文献[4]中提到的韩国 Kangjin 工程, 实际工程中, 为考虑安装、绝缘材料的成本, 可能将 UPFC 并联侧换流变压器接在低电压等级母线处。国内目前第一个 UPFC 工程—南京西环网统一潮流控制器示范工程(简称“南京 UPFC 工程”)即采用该种 UPFC 接法: 其并联侧换流变压器接入已有的燕子矶变电站的 35 kV 低压侧母线, 再通过该变电站进行升压,

基金项目: 国家自然科学基金(51407028); 江苏省自然科学基金(BK20140633)

并经过 220 kV 输电线路, 接入到需要控制电压的铁北 220 kV 母线上。南京 UPFC 工程作为我国第一个, 世界上第四个 UPFC 工程, 其工程实践对 UPFC 的理论研究也具有指导意义。以南京 UPFC 工程为例, 对采用该结构的 UPFC 进行仿真分析时, 需要考虑到 UPFC 对该升压变电站以及后续线路的影响。UPFC 并联侧接入后改变了燕子矶变电站流过的电流以及与该变电站相连线路的潮流; 可能会改变发生短路故障时燕子矶变电站的短路电流, 从而影响燕子矶变电站的热稳定性评估结果; 发生故障时, UPFC 的接入对燕子矶变电站以及与其相连线路的继电保护装置的动作可能产生影响。因此, 仿真时需要使用能够体现上述影响的 UPFC 模型。

目前, 对含 UPFC 的系统进行潮流计算时, 常采用文献[5-8]中使用的等效功率注入法。采用功率注入法对含 UPFC 的系统进行潮流计算, 可将 UPFC 对系统的影响等效到对应线路的两侧节点上, 这样可在不修改原来节点导纳阵的情况下嵌入 UPFC 模型, 最大限度地利用传统潮流计算中雅克比矩阵形成的公式和经验^[9]。然而采用现有的 UPFC 功率注入模型对使用上述实际工程中接法的 UPFC 进行仿真时, 由于 UPFC 产生的附加注入功率仅注入到对应线路的两侧节点上, UPFC 对低压母线及与之相连的变电站、线路的影响均无法体现出来。

为解决现有 UPFC 模型无法体现出 UPFC 对低压母线及与之相连的变电站、线路的影响的问题, 本文基于功率注入法, 提出了一种 UPFC 三节点功率注入模型, 将 UPFC 现有的两节点功率注入模型改进为三节点功率注入, 推导了其数学表达, 并利用 PSASP 的用户自定义模型(User Defined, UD)功能搭建了该模型。将其应用于南京 UPFC 工程中, 并与现有 UPFC 模型进行了比较, 该模型能够实现 UPFC 的控制功能, 并且能够体现南京 UPFC 工程中 UPFC 特殊结构所带来的影响。采用该模型对该工程进行仿真分析时, 得出结果更加接近工程实际, 具有更好的真实性与可信度。

1 UPFC 三节点功率注入模型

1.1 现有 UPFC 基本结构

图 1 为现有的 UPFC 的结构示意图, 它由两个通过直流电容连接的电压源型换流器组成, 换流器 1 的输出部分通过一个并联变压器连接到系统中, 换流器 2 的输出部分由一个与线路串联的变压器连接到线路中, 直流电容的电压维持不变。

串联侧通过向所接线路叠加一个幅值和相位均可控的电压来控制线路潮流。并联侧向串联侧提供

所需的有功功率, 维持直流电容电压恒定, 并通过与系统交换无功, 稳定并联接入点电压^[10]。

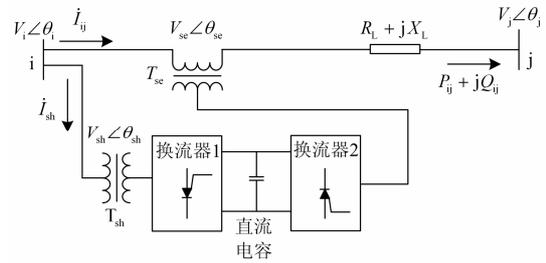


图 1 UPFC 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of UPFC

进行系统分析时, UPFC 可使用图 2 所示的等值电路来表示。图中将 UPFC 的串联部分等效成一个理想电压源 $V_{sc} \angle \theta_{sc}$ 和串联变压器电抗的串联, UPFC 的并联部分等效为一个理想电压源 $V_{sh} \angle \theta_{sh}$ 和并联变压器电抗的串联。理想电压源的大小 V_{sc} 、 V_{sh} 和相角 θ_{sc} 、 θ_{sh} 均可以控制。

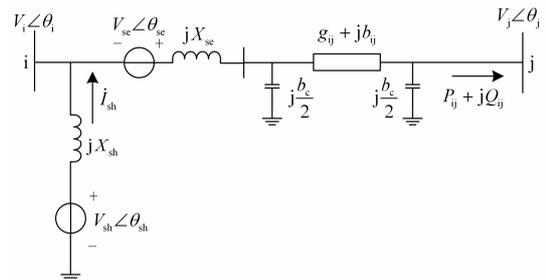


图 2 UPFC 的等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of UPFC

1.2 实际工程中 UPFC 特殊结构

与文献[11-15]中将 UPFC 并联侧换流变压器直接接入高压侧不同, 在一些实际工程中, 考虑到绝缘性能、安装场地以及制造成本等问题, 会将 UPFC 并联侧变压器先接入某个变电站的低压母线, 然后再通过该变电站升压, 经交流线路与串联侧的一端相连。其结构图如图 3 所示。其中 T 为升压变电站, 通过交流线 im 连接到 UPFC 的 i 侧节点。

该种接法在今后的 UPFC 实际工程中可能得到广泛采用, 南京 UPFC 工程即是一个典型的案例。然而采用现有的 UPFC 模型对使用该种接法的 UPFC 系统进行仿真分析时, 以下为 UPFC 对变电站 T 以及线路 im 的影响: UPFC 接入后对变电站 T 流过的电流以及线路 im 的潮流的影响; 对短路故障时变电站 T 的短路电流的影响; 对变电站 T 以及线路 im 热稳定性评估的影响; 发生故障时, UPFC 的接入对变电站 T 以及与其相连线路的继电保护装

置的动的影响等, 均无法体现出来。所以需要采用与该种接法对应的 UPFC 三节点功率注入模型。

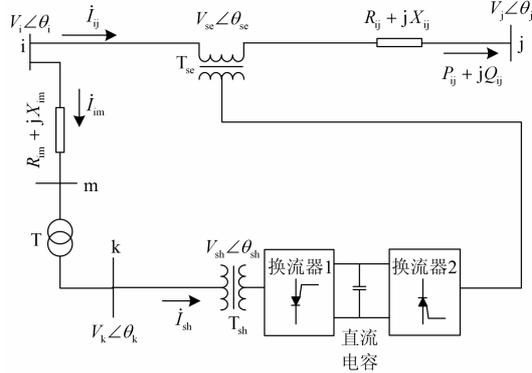


图3 一种实际工程中的 UPFC 结构

Fig. 3 Structure of UPFC in certain UPFC project

1.3 UPFC 三节点功率注入模型数学推导

根据图3所示的实际工程的 UPFC 结构, 得到该 UPFC 的等值电路图, 如图4所示。

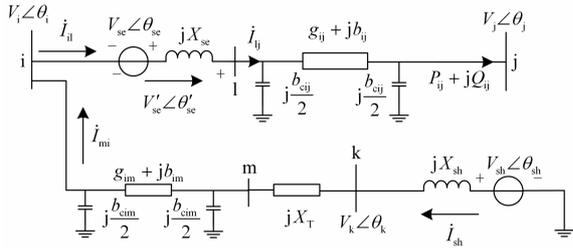


图4 一种实际工程中的 UPFC 等值电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of UPFC in certain UPFC project

图中, X_{sc} 、 X_{sh} 分别为 UPFC 串联侧变压器和并联侧变压器的电抗值, 忽略其电阻; X_T 为变电站 T 的电抗值, 同时也忽略其电阻; i_{sh} 为 UPFC 并联侧流向低电压等级母线 k 的电流; $V'_se \angle \theta'_se$ 为理想电压源电压 $V_{se} \angle \theta_{se}$ 与串联变压器电抗压降合成得到的电压, 有如下关系:

$$V'_se \angle \theta'_se = V_{se} \angle \theta_{se} - jX_{sc} \cdot i_{ij} \quad (1)$$

并联侧电压源 $V_{sh} \angle \theta_{sh}$ 和并联侧输出电流 i_{sh} 的关系为

$$V_{sh} \angle \theta_{sh} = V_k \angle \theta_k + jX_{sh} \cdot i_{sh} \quad (2)$$

由图4得到 UPFC 的三节点功率注入模型由图5所示。

图中: S_{is} , S_{js} , S_{ks} 分别代表 UPFC 对 i, j, k 节点的注入功率; $P_{ij0} + jQ_{ij0}$ 是 UPFC 所在线路不含 UPFC 时的自然潮流, 只与节点 i 和 j 的电压大小与相角有关, 表达式为

$$P_{ij0} = V_i V_j g_{ij} \cos \theta_{ij} - V_i V_j b_{ij} \sin \theta_{ij} - V_j^2 g_{ij} \quad (3)$$

$$Q_{ij0} = -V_i V_j g_{ij} \sin \theta_{ij} - V_i V_j b_{ij} \cos \theta_{ij} + V_j^2 (b_{ij} + b_{cij} / 2) \quad (4)$$

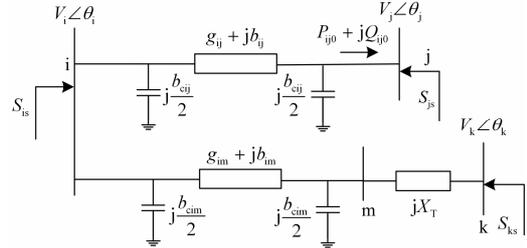


图5 UPFC 的三节点功率注入模型

Fig. 5 Three bus power injection model of UPFC

与现有模型类似, 将 UPFC 的并联电压源输出的电流 i_{sh} 相对于 V'_k 进一步等效为有功分量 I_p 与无功分量 I_q 的叠加。根据 UPFC 自身有功平衡, 可得到

$$V_k I_p + V_{se}'^2 g_{ij} + V_{se}' V_i [g_{ij} \cos(\theta'_{se} - \theta_i) + (b_{ij} + b_{cij} / 2) \sin(\theta'_{se} - \theta_i)] - \quad (5)$$

$$V_{se}' V_j (g_{ij} \cos(\theta'_{se} - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta'_{se} - \theta_j)) = 0$$

根据功率注入法并将式(5)代入消去 I_p , 可以得到 UPFC 三节点功率注入模型的各附加注入功率为

$$P_{is} = -V_i V_{se}' [g_{ij} \cos(\theta'_{se} - \theta_i) - (b_{ij} + b_{cij} / 2) \cdot \sin(\theta'_{se} - \theta_i)] \quad (6)$$

$$Q_{is} = V_i V_{se}' [g_{ij} \sin(\theta'_{se} - \theta_i) + (b_{ij} + b_{cij} / 2) \cdot \cos(\theta'_{se} - \theta_i)] \quad (7)$$

$$P_{js} = V_j V_{se}' [g_{ij} \cos(\theta'_{se} - \theta_j) - b_{ij} \sin(\theta'_{se} - \theta_j)] \quad (8)$$

$$Q_{js} = -V_j V_{se}' [g_{ij} \sin(\theta'_{se} - \theta_j) + b_{ij} \cos(\theta'_{se} - \theta_j)] \quad (9)$$

$$P_{ks} = -V_{se}'^2 g_{ij} - V_{se}' V_i [g_{ij} \cos(\theta'_{se} - \theta_i) + (b_{ij} + b_{cij} / 2) \sin(\theta'_{se} - \theta_i)] + \quad (10)$$

$$V_{se}' V_j (g_{ij} \cos(\theta'_{se} - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta'_{se} - \theta_j)) \quad (11)$$

$$Q_{ks} = V_k I_q$$

式中: P_{is} 、 P_{js} 、 P_{ks} 分别是 UPFC 对节点 i、j、k 的注入有功; Q_{is} 、 Q_{js} 、 Q_{ks} 分别是 UPFC 对节点 i、j、k 的注入无功。

式(1)、式(2)、式(6)~式(11)构成了 UPFC 三节点功率注入模型。

1.4 基于 PSASP 用户自定义功能的 UPFC 三节点功率注入模型实现

PSASP 可进行电力系统的各种分析计算, 用户

自定义模型(UD)的引入为新型电力元件的建模提供了有效途径^[16]。本文基于UD对UPFC的三节点功率注入模型进行建模。在潮流计算时,UD从PSASP潮流程序(LF)的数据接口中读取输入信息,计算完成后再将输出信息从数据接口返回给LF程序,实现LF与UD的交替求解,直至受控母线电压和线路潮流达到控制目标值,计算结束。

本文UD的输入信息分别为节点*i*、*j*、*k*的电压幅值、相角和受控线路潮流,输出信息为注入节点*i*、*j*、*k*的有功功率和无功功率。

加入UPFC后的线路潮流 $P_{ij} + jQ_{ij}$ 与*j*侧注入功率 $P_{js} + jQ_{js}$ 和自然潮流 $P_{ij0} + jQ_{ij0}$ 的关系为

$$P_{js} = P_{ij} - P_{ij0} \quad (12)$$

$$Q_{js} = Q_{ij} - Q_{ij0} \quad (13)$$

给定线路*ij*潮流 $P_{ref} + jQ_{ref}$ 后,可以将 P_{ref} 、 Q_{ref} 分别代入式(12)、式(13)中替换 P_{ij} 、 Q_{ij} ,并求出*j*侧节点的注入功率 $P_{js} + jQ_{js}$ 。通过观察式(8)、式(9)可知,如果知道 P_{js} 、 Q_{js} ,联立求解方程(8)~(9)可以直接求出 V'_{se} 和 θ'_{se} ,进而可以求出 P_{is} 、 Q_{is} 、 P_{ks} 。

由于*i*节点的电压与UPFC并联侧注入的无功有直接关系,所以考虑将PI控制作为UPFC并联侧的无功注入功率控制规律,表示为

$$Q_{ks} = (K_p + \frac{K_i}{s})(V_{ref} - V_i) \quad (14)$$

其中: K_p 、 K_i 分别为母线电压控制的比例、积分系数; V_{ref} 为*i*侧节点电压的给定值。

将UD模型中的输入信息代入式(6)、式(7)、式(10)、式(12)~式(14),得到输出信息,即可在UD中建立起UPFC三节点功率注入模型。

其收敛条件为

$$\begin{cases} |V_{ref} - V_i| < \varepsilon \\ |P_{ref} - P_{ij}| < \varepsilon \\ |Q_{ref} - Q_{ij}| < \varepsilon \end{cases} \quad (15)$$

式中, ε 为收敛精度。

LF与UD交替迭代过程如下。

步骤1:LF程序采用平直启动初始条件进行潮流计算。

步骤2:UD从数据接口读取输入信息,通过联立式(8)、式(9)、式(12)、式(13)计算初始的UPFC控制量 V'_{se} 和 θ'_{se} ,并通过式(6)、式(7)、式(10)、式(12)~式(14)计算出输出信息,返回给LF程序。

步骤3:LF程序获得UD的输出信息,经计算

后得出新的系统状态变量值。

步骤4:UD从LF程序中获取新的输入信息,判断是否满足式(15)的收敛条件,如不满足则进行下一次迭代,返回步骤2。

步骤5:满足潮流收敛条件后,将最后得到的 V'_{se} 和 θ'_{se} 值代入式(1)中,求解出UPFC串联侧控制量 V_{sc} 和 θ_{sc} 。将最后得到的 Q_{ks} 代入式(11),并联立式(2)、式(5)、式(11),求解出UPFC并联侧控制量 V_{sh} 和 θ_{sh} 。

2 UPFC三节点功率注入模型在南京UPFC工程中的应用

2.1 南京UPFC工程中UPFC结构

南京UPFC工程的UPFC设备建设在220 kV铁北开关站,用于控制铁北到晓庄线路的潮流以及铁北220 kV母线电压,挖掘现有电网的潜力,提高南京西环网整体的供电能力,避免或推迟部分代价高昂、建设难度大的电缆通道的建设。与现有理论研究中将UPFC并联侧换流变压器直接接入高压侧不同,由于南京西环网对无功补偿的需求不大,南京UPFC工程将UPFC并联侧换流变压器接入220 kV铁北母线邻近的220 kV燕子矶变电站35 kV低压母线处,如图6所示。这样一来,通过接入已有升压变压器的低压侧,可降低UPFC并联侧换流变压器的投资成本,同时由于UPFC并联侧换流变压器电压等级降低,UPFC体积与占地规模也会相应减小,节省用地。因此,对南京UPFC工程中的系统进行研究分析时,需要使用UPFC三节点功率注入模型。

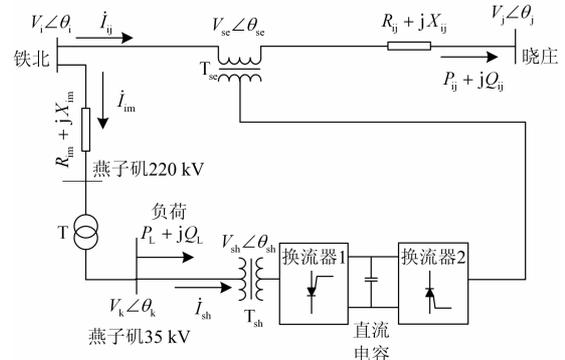


图6 南京UPFC工程的UPFC结构

Fig. 6 Structure of UPFC in Nanjing UPFC project

2.2 算例研究

采用江苏省南京市电网2015年冬季运行方式验证本文所提模型的正确性和有效性。南京电网中铁北到晓庄线路附近的220 kV电网结构如图7所示。

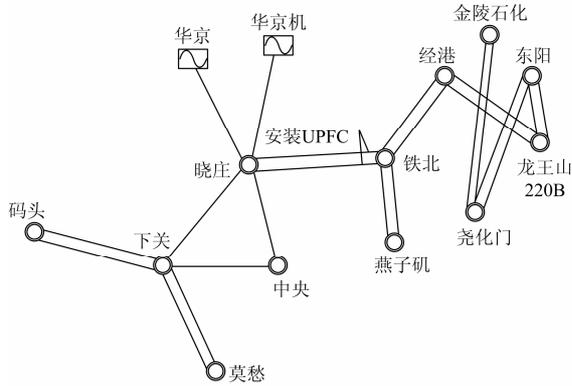


图 7 铁北-晓庄线附近 220 kV 电网接线图

Fig. 7 220 kV network near the line of Tiebei to Xiaozhuang

UPFC 串联侧安装在铁北-晓庄双回线路的铁北侧, UPFC 并联侧安装在燕子矶变的 35 kV 低压母线侧。铁北-晓庄双回线为受控线路, 铁北节点为受控母线, 铁北与晓庄及燕子矶 35 kV 母线作为功率注入节点。

UPFC 串联侧耦合变压器注入电压最大值 $V_{se_max} = 0.115 \text{ p.u.}$, 串联侧耦合变压器内电抗 $X_{se} = 0.0037 \text{ p.u.}$, 并联侧换流变压器内电抗 $X_{sh} = 0.004 \text{ p.u.}$, PI 控制器参数为: $K_p = 1, K_i = 5$ 。

燕子矶变内电抗 $X_T = 0.0887 \text{ p.u.}$ 。

未安装 UPFC 时, 双回线路潮流 $P_{Line} = 3.8821 \text{ p.u.}$, $Q_{Line} = -0.5460 \text{ p.u.}$, 母线铁北处的电压 $V_s = 0.9982 \text{ p.u.}$ 。加入 UPFC 后, 设定线路无功潮流目标值 $Q_{Line_ref} = -0.54 \text{ p.u.}$, 改变铁北处电压目标值 V_{sref} 与受控线路的有功潮流目标值 P_{Line_ref} , 使用 UPFC 三节点功率注入模型进行潮流计算, 控制精度为 10^{-3} 。潮流结果如表 1 所示。

在被控线路处采用现有 UPFC 模型, 其并联侧换流变接在铁北母线处, UPFC 各参数与三节点功率注入模型的参数一致, 将燕子矶变电站以及燕子矶-铁北线路的阻抗归算到 UPFC 并联侧换流变内抗之中, 对其进行潮流计算, 控制精度为 10^{-3} 。并将得到现有 UPFC 模型的控制量与 UPFC 三节点功率注入模型的控制量进行对比, 结果见表 2。

分别使用两种模型时, 对燕子矶变电站及燕子矶-铁北线路的电流进行对比, 观察两种模型对其的影响, 结果见表 3。未加入 UPFC 时, 燕子矶-铁北双回线电流为 1.7373 p.u. , 燕子矶变电站高压侧电流为 1.1152 p.u. 。

表 1 含 UPFC 三节点功率注入模型的南京电网潮流

Table 1 Power flow of Nanjing grid with UPFC three bus power injection model

算例	控制目标			控制结果			新型 UPFC 模型控制量	
	P_{Line_ref}	Q_{Line_ref}	V_{sref}	P_{Line}	Q_{Line}	V_s	$V_{se} \angle \theta_{se}$	$V_{sh} \angle \theta_{sh}$
1	1.80	-0.54	1.000	1.8001	-0.5400	1.0000	$0.0690 \angle -93.56^\circ$	$0.9499 \angle -0.09^\circ$
2	2.78	-0.54	1.002	2.7800	-0.5399	1.0021	$0.0336 \angle -99.42^\circ$	$0.9759 \angle -0.10^\circ$
3	3.76	-0.54	1.004	3.7601	-0.5399	1.0039	$0.0072 \angle 158.49^\circ$	$0.9946 \angle -0.12^\circ$
4	4.74	-0.54	1.006	4.7400	-0.5401	1.0060	$0.0392 \angle 102.40^\circ$	$1.0112 \angle -0.13^\circ$
5	5.72	-0.54	1.007	5.7195	-0.5401	1.0070	$0.0746 \angle 97.20^\circ$	$1.0148 \angle -0.15^\circ$
6	6.70	-0.54	1.009	6.6995	-0.5403	1.0090	$0.1103 \angle 96.02^\circ$	$1.0225 \angle -0.17^\circ$

表 2 UPFC 三节点功率注入模型与现有模型对比

Table 2 Comparison between three bus power injection UPFC model and existing model

算例	控制目标			传统 UPFC 模型控制量		新型 UPFC 模型控制量	
	P_{Line_ref}	Q_{Line_ref}	V_{sref}	$V_{se} \angle \theta_{se}$	$V_{sh} \angle \theta_{sh}$	$V_{se} \angle \theta_{se}$	$V_{sh} \angle \theta_{sh}$
1	1.80	-0.54	1.000	$0.0690 \angle -93.59^\circ$	$0.9990 \angle 0.06^\circ$	$0.0690 \angle -93.56^\circ$	$0.9499 \angle -0.09^\circ$
2	2.78	-0.54	1.002	$0.0336 \angle -99.26^\circ$	$1.0238 \angle 0.04^\circ$	$0.0336 \angle -99.42^\circ$	$0.9759 \angle -0.10^\circ$
3	3.76	-0.54	1.004	$0.0073 \angle 158.67^\circ$	$1.0441 \angle 0.03^\circ$	$0.0072 \angle 158.49^\circ$	$0.9946 \angle -0.12^\circ$
4	4.74	-0.54	1.006	$0.0392 \angle 102.42^\circ$	$1.0598 \angle 0.01^\circ$	$0.0392 \angle 102.40^\circ$	$1.0112 \angle -0.13^\circ$
5	5.72	-0.54	1.007	$0.0746 \angle 97.23^\circ$	$1.0633 \angle -0.01^\circ$	$0.0746 \angle 97.20^\circ$	$1.0148 \angle -0.15^\circ$
6	6.70	-0.54	1.009	$0.1103 \angle 96.01^\circ$	$1.0702 \angle -0.03^\circ$	$0.1103 \angle 96.02^\circ$	$1.0225 \angle -0.17^\circ$

表 3 使用两种模型时燕子矶-铁北线路电流以及燕子矶高压侧电流对比

Table 3 Comparison of the current of Yanziji-Tiebei line and high voltage side of Yanziji transformer using two models

算例	控制目标			采用传统 UPFC 模型		采用新型 UPFC 模型	
	P_{Line_ref}	Q_{Line_ref}	V_{sef}	燕子矶-铁北双回线电流	燕子矶变高压侧电流	燕子矶-铁北双回线电流	燕子矶变高压侧电流
	p.u.						
1	1.80	-0.54	1.000	1.733 7	1.114 1	1.699 3	1.037 7
2	2.78	-0.54	1.002	1.729 8	1.113 0	1.619 8	1.271 9
3	3.76	-0.54	1.004	1.725 9	1.111 9	1.589 8	1.417 0
4	4.74	-0.54	1.006	1.722 0	1.110 7	1.582 3	1.531 9
5	5.72	-0.54	1.007	1.720 1	1.110 1	1.602 0	1.569 7
6	6.70	-0.54	1.009	1.716 3	1.109 0	1.622 9	1.628 3

由表 1 可知, UPFC 三节点功率注入模型可以很好地将控制目标控制在指定值, 实现了 UPFC 的控制功能。通过对比表 2 中的数据可知, 相同的控制目标下, 使用现有 UPFC 模型进行潮流计算得出的 UPFC 串联侧控制量与 UPFC 三节点功率注入模型进行潮流计算得出的 UPFC 串联侧控制量几乎一样, 而采用现有模型的 UPFC 并联侧控制量与采用本文提出模型的 UPFC 并联侧控制量有着很大的差别, 这也说明使用传统模型对南京 UPFC 工程进行仿真分析是不精确的。再对比表 3 的数据, 采用现有 UPFC 模型时, 燕子矶-铁北线路的电流和燕子矶变高压侧的电流与未加 UPFC 时的情况接近, 与采用 UPFC 三节点功率注入模型进行仿真计算得出的结果有很大差别。可以看出, 采用现有 UPFC 模型对南京 UPFC 工程中的 UPFC 进行仿真计算无法得到 UPFC 对燕子矶-铁北线路以及燕子矶变电站的影响, 而采用新型 UPFC 三节点功率注入模型则可以仿真出该特殊结构的 UPFC 对线路以及变电站的影响。综合上述分析, 对南京 UPFC 工程进行仿真计算时, 使用本文提出的 UPFC 三节点功率注入模型更为适用。

3 结论

本文针对实际工程中会出现的将 UPFC 并联侧变压器接在低电压等级母线处的情况, 提出了一种 UPFC 三节点功率注入模型, 解决了现有 UPFC 模型无法体现出采用该种接法的 UPFC 对低压母线及后续线路的影响的问题。本文推导了 UPFC 三节点功率注入模型的数学表达式, 利用 PSASP 的 UD 功能建立了 UPFC 三节点功率注入模型, 并将其应用在国内首个 UPFC 实际工程—南京 UPFC 工程中。南京 UPFC 工程中 UPFC 并联侧换流变接在燕子矶变电站低电压等级母线处, 对其进行分析研究时需采用三节点功率注入模型。通过在南京系统中加入

UPFC 三节点功率注入模型, 验证了该模型的正确性和有效性。本文提出的模型能够实现 UPFC 的控制功能, 对实际工程进行仿真分析时, 体现了南京 UPFC 工程中 UPFC 特殊结构为燕子矶变电站及燕子矶-铁北线路带来的影响, 具有更好的准确性与可信度。同时, 本文为 UPFC 根据工程实际需要而进行改进的推导与建模提供了思路与方法。另外, 本文采用功率注入法进行建模工作对 UPFC 与其他商业软件的接口也有借鉴意义。

参考文献

- [1] 朱涛, 段荣华, 汪震. 不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网动态稳定水平的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 65-70.
ZHU Tao, DUAN Ronghua, WANG Zhen. Research on different types of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 65-70.
- [2] 李骈文. 美国 INEZ 变电站统一潮流控制器简介[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 84-87.
LI Pianwen. A brief introduction to principle of UPFC installed in INEZ substation of AEP system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 84-87.
- [3] 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, 2003 IEEE PES, Dallas, TX, 2003: 1126-1130.
- [4] AHN S J, LEE D W, MOON S I. Structure and operation strategies of an automatic supervisory control system of the KEPCO UPFC[J]. Electrical Engineer, 2008, 90(7): 511-519.
- [5] 李娟, 司双, 陈继军. 含 FACTS 元件的电力系统三相潮流分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 132-137.
LI Juan, SI Shuang, CHEN Jijun. Analysis of three phase

- power flow on power system with FACTS[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 132-137.
- [6] 刘前进, 黎雄, 孙元章. 基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 6-9.
LIU Qianjin, LI Xiong, SUN Yuanzhang. Power flow modeling of FACTS based on PSASP[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 6-9.
- [7] 万波, 张焰. 一种新的 UPFC 潮流计算模型[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 25-27.
WAN Bo, ZHANG Yan. A new UPFC model for power flow analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 25-27.
- [8] 姚蜀军, 宋晓燕, 汪燕, 等. 基于 PSASP 的统一潮流控制器潮流建模与仿真[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(5): 11-16.
YAO Shujun, SONG Xiaoyan, WANG Yan, et al. Power flow modeling of unified power flow controller based on power system analysis software package (PSASP)[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 11-16.
- [9] 刘前进, 孙元章, 黎雄, 等. 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.
LIU Qianjin, SUN Yuanzhang, LI Xiong, et al. Power flow control characteristics of UPFC based on the power injected method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(3): 55-58.
- [10] 陈柏超, 曾永胜, 刘俊博, 等. 基于 Sen Transformer 的新型统一潮流控制器的仿真与实验[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 233-238.
CHEN Baichao, ZENG Yongsheng, LIU Junbo, et al. Simulation and experimental research of a novel unified power flow controller based on Sen Transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 233-238.
- [11] 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.
CHEN Yefei, LI Linchuan, ZHANG Fang, et al. Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current-injection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 69-74.
- [12] 易成星, 周前, 杨伟. 统一潮流控制器在风电机组并网运行中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 46-51.
YI Chengxing, ZHOU Qian, YANG Wei. Implementation of UPFC on wind farm interconnected to power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 46-51.
- [13] 涂春鸣, 姜飞, 郭成, 等. 多功能固态限流器的现状及展望[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 146-153.
TU Chunming, JIANG Fei, GUO Cheng, et al. Present state and perspectives of multi-function solid-state fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 146-153.
- [14] 李婷, 吴敏, 何勇. 计及广域测量系统时滞影响的灵活交流输电系统阻尼控制器多目标设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 227-234.
LI Ting, WU Min, HE Yong. Multi-objective design of FACTS damping controller based on WAMS with signal transmission delay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 227-234.
- [15] 尹璐, 舒彬, 张璞, 等. 统一潮流控制器在电力系统中的 PSD-BPA 和 MATLAB 联合建模与仿真方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 383-388.
YIN Lu, SHU Bin, ZHANG Pu, et al. A PSD-BPA and MATLAB joint modeling and simulation method with UPFC for power system flow calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 383-388.
- [16] 陈剑平, 李林川, 张芳, 等. 基于 PSASP 的 UPFC 潮流控制建模与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 66-70.
CHEN Jianping, LI Linchuan, ZHANG Fang, et al. Modeling and simulation of power flow control for UPFC based on PSASP[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(2): 66-70.

收稿日期: 2015-09-26; 修回日期: 2015-12-16

作者简介:

王海潜(1963-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划及可靠性; E-mail: 15951900696@139.com

祁万春(1979-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划及可靠性; E-mail: 13915983017@139.com

乔黎伟(1973-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划及可靠性。E-mail: 13338606406@163.com

(编辑 葛艳娜)