

含 UPFC 的电力系统潮流计算方法研究

宋鹏程¹, 王莹², 许文超², 徐政¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102)

摘要:分析了在基于电力系统仿真软件(PSS/E)实现含统一潮流控制器(UPFC)的电力系统潮流计算和动态仿真的过程中,常规含UPFC的潮流计算方法存在的问题,提出了一种两阶段的含UPFC的电力系统潮流计算方法,并在PSS/E中对所提出的含UPFC的潮流计算方法进行了验证。

关键词:统一潮流控制器;潮流计算;PSS/E

中图分类号:TM744

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)01-0024-04

作为最新一代的柔性交流输电系统(FACTS)装置,统一潮流控制器(UPFC)能够实现潮流的精确控制,提高断面输送功率极限,对电网动态稳定性和电压稳定性均有较大影响^[1-3]。目前,基于MMC技术的UPFC已在江苏电网220 kV系统内找到实际应用前景^[4]。含UPFC的电力系统潮流计算和动态仿真对UPFC投运后系统动态特性分析以及UPFC系统级控制策略的制定是必不可少的。

目前潮流计算中UPFC模型多采用两注入源的模型^[5-7],在基于电力系统仿真软件(PSS/E)实现含UPFC的电力系统潮流计算过程中发现,常规含UPFC的潮流计算方法存在一些问题,无法完成潮流计算。同时,动态仿真程序无法在未进行潮流计算的情况下进行初始化,后续动态仿真因而无法进行。文中提出了一种两阶段的含UPFC的电力系统潮流计算方法,并进行了验证。

1 常规含UPFC的电力系统潮流计算方法

假定电力网络中的线路 $k-n$ 的 k 节点装有UPFC,如图1(a)所示。在UPFC运行中,通常UPFC并联侧换流器的控制目标为定直流侧电压和定交流母线电压 V_k ,串联侧换流器的控制目标为定线路有功功率 P_m 和无功功率 Q_m 。在电力系统的潮流计算时可用如下方法对含UPFC线路进行简单的处理,用常规的电力系统潮流计算程序直接进行计算^[5]:第一步,在靠近 k 节点的UPFC后增加辅助节点 m ,如图1(b)所示。第二步,UPFC定线路功率的作用相当于将节点 m 看作PQ节点,其中 $P_m = P_{\text{设定值}}$, $Q_m = Q_{\text{设定值}}$;把节点 k 看作是PV节点,其中 $P_k = P_m = P_{\text{设定值}}$, $V_k = V_{\text{设定值}}$,如图1(c)所示。经上述两步处理后,含UPFC的电力系统的潮流计算已化为常规电力系统的潮流计算,可以用常规的潮流计算程序来解决。

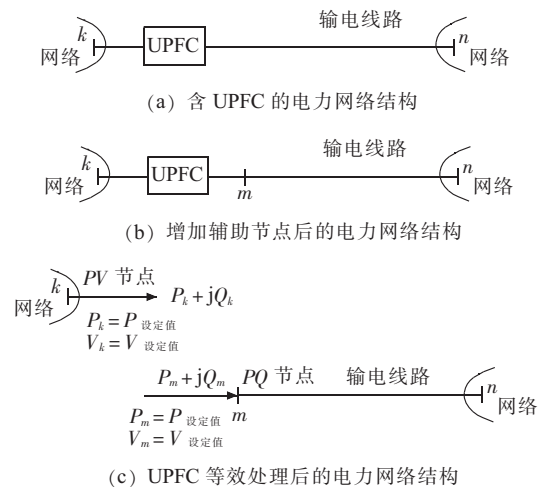


图1 UPFC潮流计算模型

2 常规含UPFC的电力系统潮流计算方法存在的问题

在研究含UPFC的电力系统潮流计算方法时,所用模型为图2中常规UPFC装置结构,并联侧换流器通过并联变压器连在母线 k 上。然而,为满足不同的潮流控制需求,不同的电网结构中加装的UPFC装置结构存在差异。图3为南京西环网UPFC的示范工程结构^[4],南京UPFC工程串联侧换流器与线路交换的有功功率比较小,对并联侧换流器的直流容量需求较小,可以将2个串联侧换流器共用1个并联侧换流器,降低成本和体积;由于铁北站220 kV交流系统对无功需求不大,将并联侧接至附近35 kV母线,可以减小并联变压器成本和体积。

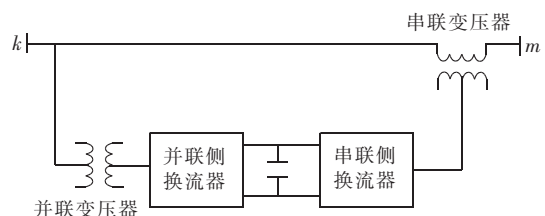


图2 UPFC装置结构

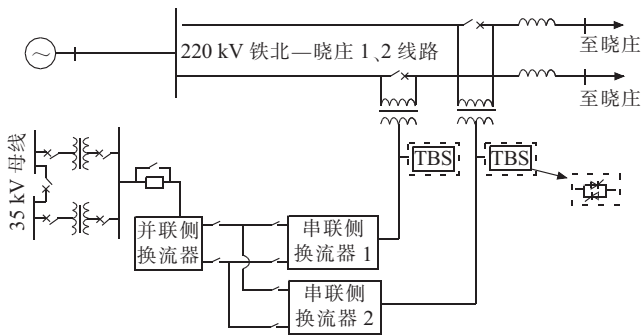


图3 南京西环网 UPFC 装置结构

在进行含 UPFC 的电力系统潮流计算时, 常规含 UPFC 的电力系统潮流计算方法存在以下问题:

(1) 当 UPFC 并联变压器不直接连在母线 k 上时, 注入节点 k 的有功 P_k 与流出节点 m 的有功 P_m 不再相等。

(2) 受容量限制, 当 UPFC 不能实现其潮流控制目标时, 常规含 UPFC 的电力系统潮流计算方法无法实现考虑变量约束条件的潮流计算, 只能进行约束变量的校核。

(3) 当 UPFC 并联侧换流器达到容量限值或并联换流器控制目标从定交流母线电压变为定无功功率时, 交流母线 k 电压不再恒定, 节点 k 将由 PV 节点变为 PQ 节点, 此时不能使用常规潮流计算程序直接进行计算。

3 新型含 UPFC 的电力系统潮流计算方法

为解决常规含 UPFC 的电力系统潮流计算方法中存在的问题, 实现改进拓扑下 UPFC 潮流计算的模型应至少包含 3 个注入源, 此时不能使用常规潮流计算程序直接进行计算, 需要不断修改注入源的注入量带入网络, 直至潮流计算收敛。同时, 在动态仿真时 UPFC 等效为 1 个并联电流源与 1 个串联电压源的形式^[8-10], PSS/E 自定义模型与程序接口使用的是发电机模型, 需要 3 台发电机来等效 UPFC 的接入, 其中 2 台发电机等效串联电压源接入系统, 1 台发电机等效并联电流源接入。为与动态仿真统一, 潮流计算时 UPFC 的 3 注入源也使用发电机模型, 此时 3 个注入节点均为 PV 节点, 这会使潮流计算的收敛过程更加复杂。

为实现用常规潮流计算程序直接计算含 UPFC 的电力系统潮流, 为动态仿真程序提供精确的初始运行点, 文中提出了一种两阶段的含 UPFC 的电力系统潮流计算方法: 第一阶段给定一组特殊的 UPFC 输出变量, 使常规潮流计算程序能够直接计算含 UPFC 的电力系统潮流, 第一阶段的潮流计算结果作为第二阶段的初始运行点, 在动态仿真程序中将潮流控制到目标值, 得到目标潮流下的潮流计算结果。假定电力网络中的线路 $k-n$ 的 k 节点装有 UPFC, 并联换流器通过并

联变压器连在母线 s 上, 如图 4 所示。

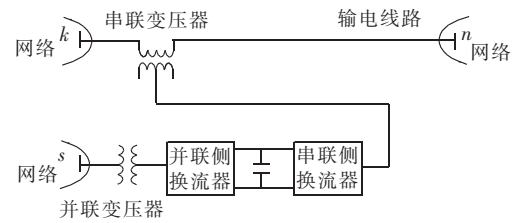


图4 UPFC 装置结构

第一阶段, 在给定的 UPFC 输出变量下进行潮流计算:

(1) 忽略串并联变压器有功损耗以及换流器本身的损耗, 当串联变压器两端电压为 0、并联变压器输出无功功率为 0 时, 此时图 4 中的电力网络可以等效为图 5(a) 中所示的电力网络, 图 5(a) 网络中不含 UPFC 装置, 可以用常规潮流计算程序直接进行计算。潮流计算结果中节点 k 、节点 s 的电压幅值以及线路 $k-n$ 的潮流分别为 V_{k0} 、 V_{s0} 以及 $P_0 + jQ_0$ 。

(2) 与常规含 UPFC 的潮流计算方法类似, 在靠近节点 k 的 UPFC 后增加辅助节点 m , 潮流计算程序中加入 3 台发电机作为 UPFC 模型, 此时 3 个节点均为 PV 节点, 其中 $P_k = P_0$, $V_k = V_{k0}$; $P_m = P_0$, $V_m = V_{k0}$; $P_s = 0$, $V_s = V_{s0}$ 。如 5(b) 所示。

(3) 经上述两步处理后, 含 UPFC 的电力系统的潮流计算已化为常规电力系统的潮流计算, 可以用常规的潮流计算程序来解决。此时得到的潮流计算结果为给定的 UPFC 输出变量下 (串联变压器两端电压为 0、并联变压器输出无功功率为 0) 的潮流计算结果, 作为第二阶段的初始运行点。

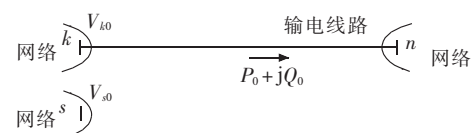
第二阶段, 得到目标潮流下的潮流计算结果:

(1) 用第一阶段的潮流计算结果对动态仿真程序进行初始化。

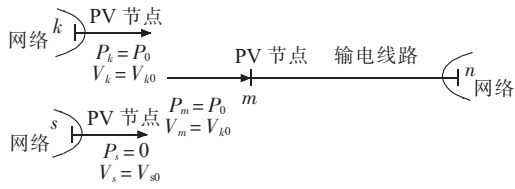
(2) 在动态仿真中修改 UPFC 控制目标值, 将潮流控制到目标值, 动态仿真达到稳定后, 用来等效 UPFC 模型的 3 个 PV 节点的电压和注入功率分别为, $P_k = P_{k1}$, $V_k = V_{k1}$; $P_m = P_{\text{设定值}}$, $V_m = V_{m1}$; $P_s = P_{s1}$, $V_s = V_{s1}$ 。

(3) 在此等效模型下的潮流结果即为含 UPFC 的电力系统在目标潮流下的潮流计算结果, 如 5(c) 所示。

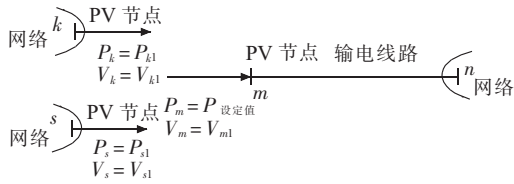
所提出的含 UPFC 的电力系统潮流计算方法流程图如图 6 所示。该含 UPFC 的电力系统潮流计算方法不局限于图 4 中的 UPFC 结构, 对于如图 3 所示的串联变流器多于 1 个的结构, 潮流计算方法仍然适用。



(a) 给定 UPFC 输出变量下的电力网络等效结构



(b) 第一阶段 UPFC 等效处理后的电力网络结构



(c) 第二阶段 UPFC 等效处理后的电力网络结构

图 5 新型 UPFC 潮流计算模型

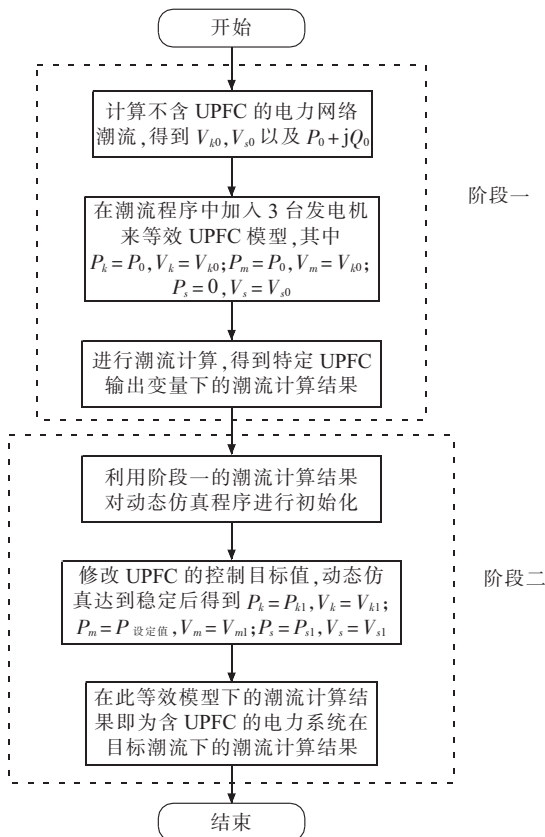


图 6 含 UPFC 的电力系统潮流计算方法流程

4 算例

算例系统是如图 7 所示的 1 个简单的电力系统, 计划在节点 2 与节点 3 之间的一回线路上安装 UPFC 装置, UPFC 串联变压器靠近节点 2, 并联变压器接于节点 5 上, 节点 6 为靠近节点 2 UPFC 后增加的辅助节点。第一阶段给定 UPFC 输出变量(串联变压器两端电压为 0、并联变压器输出无功功率为 0), 在 PSS/E 潮流计算程序中直接计算含 UPFC 的电力系统潮流, 结果如表 1 所示。所得的潮流计算结果作为第二阶段的初始运行点, 在动态仿真程序中将潮流控制到目标值, 得到目标潮流下的潮流计算结果。图 8 为第二阶段

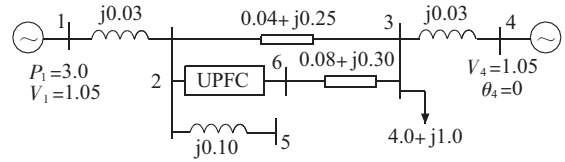
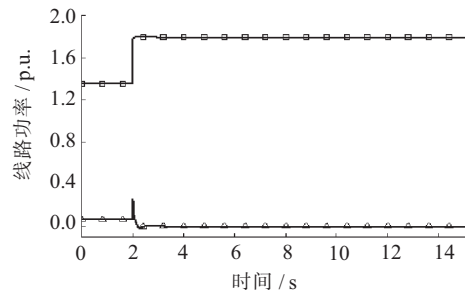


图 7 算例系统示意

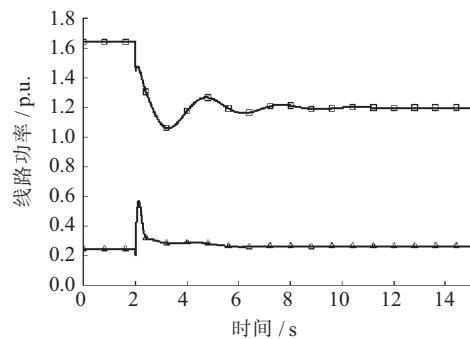
潮流的收敛过程, 具体过程如下: 0 s 时用第一阶段的潮流计算结果进行初始化, 2 s 时修改 UPFC 控制指令值(线路 6-3 的潮流控制在 $1.800 + j0.000$, 节点 5 的电压控制在 1.038)。动态仿真达到稳定后的潮流结果即为含 UPFC 的电力系统在目标潮流下的潮流计算结果, 如表 2 所示。

表 1 第一阶段潮流计算结果

节点	电压幅值 / p.u.	电压相角 / (°)	注入功率 / p.u.
1	1.050	25.62	$3.000 + j0.561$
2	1.038	20.88	$-1.355 - j0.062$
3	0.994	-2.04	$-4.000 - j1.000$
4	1.050	0.00	$1.240 + j1.999$
5	1.038	20.88	$0.000 + j0.000$
6	1.038	20.88	$1.355 + j0.062$



(a) 线路 6-3 功率曲线



(b) 线路 2-3 功率曲线

图 8 线路功率曲线

由算例分析可看出, 所提出的含 UPFC 电力系统潮流计算方法能用常规潮流计算程序直接计算含 UPFC 的电力系统潮流, 在不同的 UPFC 结构以及控制方式下均具有较好的适应性。同时解决了含 UPFC 的电力系统动态仿真无法初始化的问题, 所得潮流计算结果能够实现动态仿真初始化, 保证动态仿真的顺利进行。

表 2 第二阶段潮流计算结果

节点	电压幅值 / p.u.	电压相角 / (°)	注入功率 / p.u.
1	1.050	18.66	3.000 + j0.030
2	1.053	13.99	-1.876 + j0.639
3	0.984	-2.23	-4.000 - j1.000
4	1.050	0.00	1.339 + j2.337
5	1.038	14.39	0.076 - j0.171
6	0.956	32.80	1.800 + j0.000

5 结束语

分析了在基于电力系统仿真软件 PSS/E 实现含 UPFC 的电力系统潮流计算和动态仿真的过程中,常规含 UPFC 的潮流计算方法存在的问题,并提出了一种两阶段的含 UPFC 的电力系统潮流计算方法:第一阶段给定一组特殊的 UPFC 输出变量,使常规潮流计算程序能够直接计算含 UPFC 的电力系统潮流;第一阶段的潮流计算结果作为第二阶段的初始运行点,在动态仿真程序中将潮流控制到目标值,得到目标潮流下的潮流计算结果。

参考文献:

- [1] 宋莉. 计及 UPFC 的可用输电能力研究[D]. 吉林:东北电力大学,2009.
- [2] 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.
- [3] 刘青,马朋,邹家平. 基于 WAMS 的 UPFC 装置的附加控制

- 器设计[J]. 华北电力技术,2015(2):13-18.
- [4] 蔡晖,祁万春,黄俊辉,等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设,2015(8):73-78.
- [5] 徐政,张扬. 用常规潮流程序直接计算含统一潮流控制器的电力网络潮流[J]. 电网技术,1998,22(10):40-43.
- [6] 陈淮金,白中. 含 UPFC 电力系统的潮流计算研究[J]. 电力系统自动化,1996,20(3):23-27.
- [7] 郎兵. 含 UPFC 电力系统的潮流计算研究[J]. 华北电力技术,1998(7):15-18,55.
- [8] 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.
- [9] 黄振宇,倪以信,陈寿孙,等. UPFC 动态模型在电力系统动态分析中的实现[J]. 电力系统自动化,1999,23(6):26-30,53.
- [10] 刘皓明,朱浩骏,严正,等. 含统一潮流控制器装置的电力系统动态混合仿真接口算法研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):1-7.

作者简介:

- 宋鹏程(1990),男,山东淄博人,博士研究生,从事大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电相关研究;
- 王莹(1986),女,江苏常州人,工程师,从事电力系统规划相关研究工作;
- 许文超(1979),女,江苏东台人,高级工程师,从事电力系统规划相关研究工作;
- 徐政(1962),男,浙江海宁人,博士生导师,从事大规模直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术相关研究。

Load Flow Calculation Study for Power Systems Containing UPFC

SONG Pengcheng¹, WANG Ying², XU Wenchao², XU Zheng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhengjiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: In this paper, the conventional method for calculating load flow of power systems containing unified power flow controllers (UPFCs) is analyzed. The drawbacks of this approach during performing load flow calculation and dynamic simulation of power systems containing UPFC in PSS/E (Power System Simulator for Engineering) are discussed. A novel two-stage method for calculating load flow of power systems containing UPFCs is proposed. Case studies validate the the proposed method.

Key words: unified power flow controller (UPFC); load flow; PSS/E

(上接第 6 页)

State of the Art and Application Analysis of Unified Power Flow Controller

CHEN Gang¹, LIU Jiankun², LI Qun²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: As the most comprehensive and complicated FACTS technology, unified power flow controller's technical principle and operation mode are introduced in this paper. Also the converter technology is detailed analyzed as well as the application and background overboard. This paper also discusses the necessity, system scheme, typical topology, converter access technology and DC field scheme of the UPFC project in Nanjing western power grid. At last, the comprehensive benefits of UPFC are demonstrated. Analysis results show that UPFC plays an important role in solving the power flow control problems facing Nanjing western power grid.

Key words: flexible AC transmission; unified power flow controller; modular multilevel converter; power flow control; stability