

UPFC 的潮流和机电暂态仿真模型研究

李海峰¹, 侯俊贤², 王 毅², 罗建裕¹, 朱 斌¹

(1.江苏省电力公司,江苏 南京 210024;2.中国电力科学研究院,北京 100192)

摘 要:统一潮流控制器(UPFC)可同时控制母线电压和线路功率,对提高系统稳定性具有较大作用,建立 UPFC 的潮流和机电暂态仿真模型是电力系统仿真分析的重要基础。文中基于 UPFC 的基本原理和控制规律,提出了 UPFC 在潮流程序中的处理方法和在机电暂态稳定程序中的简化模型。在潮流程序中,将 UPFC 模型等效为两侧的功率注入和 PV 节点;在机电暂态仿真中,忽略动作速度快、影响较小的快速控制部分和内部环节,建立串联功率控制和并联电压控制的简化仿真模型。该模型在 PSD-BPA 程序中完成了开发,并与 MATLAB 详细仿真模型进行了对比,结果表明本文提出的简化模型具有较好的准确性。

关键词:UPFC;潮流;机电暂态仿真;仿真模型

中图分类号:TM713

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2015)06-0027-05

灵活交流输电设备^[1,2]具有灵活性、快速性的特点,在电力系统应用中会发生较大作用,多年来都受到较高的重视。灵活交直流输电包括并联、串联、串并结合等几种形式,并联类型主要包括静止无功补偿器(SVC)和静止无功发生器(STATCOM)^[3],串联类型主要包括可控串联补偿(TCSC)、静止同步串联补偿(SSSC)^[4,5]等,串并结合类型主要是统一潮流控制器(UPFC)^[6]。UPFC 在理论上具有较强的控制功能,可同时控制母线电压及线路功率,在暂态过程中调节迅速,对提高系统的稳定性有较大作用。

国内外对 UPFC 的研究已经开展比较多,国外开展研究较早^[6,7],且已经有部分实际设备投入运行^[8,9],并且国际组织对 UPFC 仿真模型也进行了研究^[10]。国内随着电力电子的发展,对 UPFC 也开展了大量的研究工作,包括控制系统^[11,12]、仿真模型^[13,14]等。本文主要结合电力系统仿真需求,针对 UPFC 的潮流和机电暂态仿真模型,在 UPFC 的基本原理和特点基础上,提出了 UPFC 在潮流计算中的处理方法以及在机电暂态仿真过程中的仿真模型,并针对其合理性进行了仿真验证。

1 UPFC 的基本结构

UPFC 是由并联部分和串联部分相结合组成的新型控制装置,其基本结构如图 1 所示。

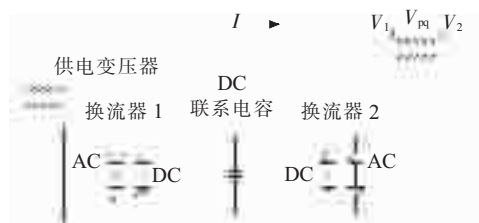


图 1 UPFC 的基本结构示意图

UPFC 最主要的特点是具有 2 个背靠背相联的由可关断电力电子器件构成的换流器,这 2 个换流器耦合在一个直流电容上。这种结构使得有功功率在 2 个换流器之间双向随意传输。换流器 1 的主要作用是通过直流联系提供或吸收换流器 2 所需的有功功率。同时,换流器 1 也可以用作并联无功补偿装置,向系统提供无功补偿。换流器 2 的主要作用提供一个串联在线路中的等值可控电压源 V_{pq} ,通过适时调节 UPFC 等值电压源的幅值和相角,调节线路有功和无功功率的变化,分别实现串联补偿、并联补偿和移相器的功能,从而可以实现多种控制目标。

2 UPFC 的稳态模型

由于 UPFC 的复杂结构,在潮流计算中,潮流的模型也会比较复杂,需要考虑并联部分对电压的控制功能、串联部分对线路有功和无功的控制功能以及串联部分和并联部分之间的关联关系。为了避免上述复杂性,在实际应用过程中也可以采用比较实用的方法进行处理来达到应用的目的。

UPFC 模型的等效电路图如图 2 所示。UPFC 两侧节点为节点 l 和 m ,将其等效为可控电压源与等效阻抗(主要是串联变压器阻抗)的串联,增加虚拟的中间节点 p 。

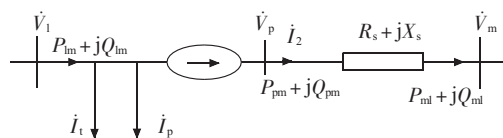


图 2 UPFC 等效电路

图 2 中, $R_s + jX_s$ 为等效阻抗, \dot{V}_l , \dot{V}_m 和 \dot{V}_p 为各节点电压, $P_{lm} + jQ_{lm}$, $P_{pm} + jQ_{pm}$ 和 $P_{ml} + jQ_{ml}$ 为各侧的功率, i_2 为线路电流, i_1 和 i_p 为等效注入电流。

由于 UPFC 的并联部分能够独立控制节点电压, 可以将节点 l 的电压幅值控制为定值 V_l , 节点 l 变为 PV 节点。UPFC 串联补偿可以同时控制所在线路输送的有功和无功功率为定值, 可以将线路传输的功率 $P_{ml} + jQ_{ml}$ 控制为定值 $P_c + jQ_c$ 。稳态时认为 UPFC 没有有功消耗, 有如下公式成立:

$$P_{lm} = P_{pm} \quad (1)$$

这样将 UPFC 从系统中删除, 代之以节点注入功率。由式(1)可以看出计算 P_{lm} 只要计算 P_{pm} 即可, 即:

$$P_{pm} + jQ_{pm} = P_c + jQ_c + (R_s + jX_s)I_2^2 \quad (2)$$

其中:

$$I_2 = \frac{S_c}{V_m} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可见, 计算 P_{pm} 时需要节点 m 的电压幅值 V_m 。所以节点 l 的有功平衡方程包含 V_m , 潮流计算需要修改雅可比矩阵。为避免修改雅可比矩阵, 可以做如下简化: 假定 V_m 的电压为 1.0 p.u. 计算 P_{pm} , 得到节点 p 的近似功率注入值 $P_{pm} + jQ_{pm}$, 从而能将节点 l 和节点 p 之间的部分从系统中移去, 代之以节点注入功率。将 UPFC 简化, 如图 3 所示。

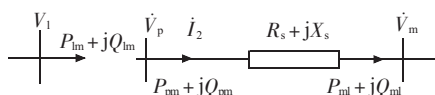


图 3 UPFC 简化等值电路

这样已知节点 l 的有功 P_{lm} 以及节点电压 V_l , 节点 p 的有功无功 P_{pm} 和 Q_{pm} 。潮流计算相当于增加一条支路和一个 PQ 节点, 不需要修改雅可比矩阵。计算结束后可以根据 UPFC 控制参数与其控制目标以及节点电压的关系式计算出 UPFC 的控制参数。需要指出的是, 采用上述简化算法, 计算结果中 UPFC 所在线路传输的功率 $P_{ml} + jQ_{ml}$ 与控制定值 $P_c + jQ_c$ 会存在一定的误差。由于 UPFC 串联变压器等值阻抗较小, 且 V_m 的实际值与基准电压值相差不大。所以误差较小。

3 UPFC 的机电暂态仿真模型

从图 1 可以看出, UPFC 具有比较复杂的结构, 串联部分相当于等效电压源、并联部分是并联无功补偿、串联部分和并联部分之间进行部分有功交换。在动态过程中, 由于外界的扰动, 使 UPFC 状态发生变化, 进而使得控制系统进行调整, 直到进入新的稳定状态。

3.1 物理结构

从 UPFC 的物理结构和功能看, UPFC 机电暂态仿真模型一般需要包含 3 个部分。

(1) 换流器 1 的控制。该控制器是并联部分的控制部分, 包含有功和无功控制 2 部分。无功控制功能类似

于无功补偿装置, 以控制母线电压作为控制信号, 控制发出的无功功率以维持母线电压恒定。有功控制的目标是为提供串联部分控制所需要的有功功率, 以直流侧电压作为控制信号, 维持直流侧电压恒定。

(2) 换流器 2 的控制。该控制器是串联部分的控制部分, 同样包含有功和无功控制。分别根据有功和无功的控制目标控制串联的有功相关电压分量和无功相关电压分量, 进而控制等效电压源的幅值和角度。

(3) 直流侧动态过程。在动态过程中, 直流侧电容电压会随着两侧换流器的有功平衡程度发生变化, 因此需要根据两侧功率计算直流侧电压大小。直流电压变化会影响到两侧控制器的动态过程。

此外, 两侧控制器的控制指令是两侧换流器的调制比, 然后根据直流电压、调制比计算交流侧电压, 进而得到控制的有功、无功。对于 PWM 调制, 根据调制比、直流电压计算交流电压的公式为:

$$V_{AC} = mkV_{DC} \quad (4)$$

式(4)中: V_{AC} 为交流电压; V_{DC} 为直流侧电压; m 为调制比; k 为内部系数。调制比应在 0 和 1 之间。

3.2 机电暂态仿真模型

由于在机电暂态过程中, 主要关注较长时间内的动态过程, 通常会忽略一些对后续动作影响较小的快速动态过程, 这样既不影响仿真的准确性、提高仿真速度, 同时避免快速动作过程对数值稳定性的影响。此外, 通常主要关注外部特性, 即对电力系统影响比较大的外部动态特性。对于 UPFC, 可以忽略其速度比较快的内环快速控制, 忽略内部电容器电压的动态变化过程, 忽略根据调制比计算交流电压的部分。

根据上述方法简化后的 UPFC 机电暂态模型主要包括串联部分控制模型和并联部分控制模型。

(1) 串联部分控制模型。UPFC 串联部分相当于电压源。以 UPFC 相连的母线电压作为参考轴, 相对节点电压分量为 d, q 轴处理, d 轴相位与节点电压垂直, 影响有功分量; q 轴与节点电压相位相同, 影响无功分量。正常情况下, 根据有功、无功控制指令来控制串联等效电压和角度, 其控制框图如图 4 所示。

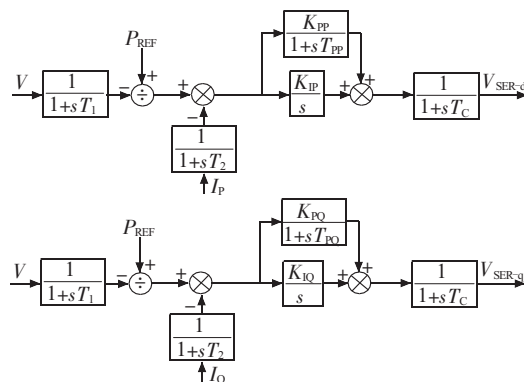


图 4 UPFC 串联部分控制模型

串联部分控制模型中包括 3 个部分: ① 输入信号, 采用控制的有功、无功功率作为输入信号, 根据母线电压转换为电流, 与实际电流的差值作为 PI 环节的输入; ② PI 控制环节, 有功和无功都分别对应 PI 控制, 电流差值作为输入信号, 输出为串联的等效电压分量; ③ 换流器延迟时间常数, 用于模拟换流器的响应延迟。

实际设备的最大能力限制是机电暂态模型中的重要组成部分。对于图 4 中的电压输出信号, 还需要考虑实际设备的限幅作用, 如图 5 所示。

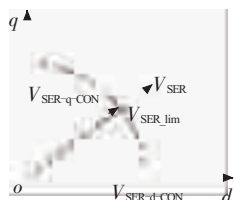


图 5 UPFC 串联部分限幅模型

UPFC 串联部分限幅模型中考虑实际设备最大等效电压限制 V_{SER_lim} , 当图 4 控制系统输出大于该最大限制, 保持角度不变, 减少等效电压幅值。

(2) 并联部分控制模型。并联部分功能主要包括两部分, 一部分是根据母线电压控制发出无功功率, 另一部分是提供串联侧需要的有功功率。在对模型进行简化、忽略直流侧电容器动态过程的情况下, 有功部分认为与串联部分相同, 可直接计算得到。而无功部分独立于有功进行控制。无功控制部分的模型如图 6 所示。

并联部分控制模型与 STATCOM 的模型基本一致, 控制节点电压差作为输入信号, 经过 PI 控制环节, 输出控制交流电压, 然后与所连接的母线电压计算最终的电流。和串联部分类似, 并联控制输出的电流也需

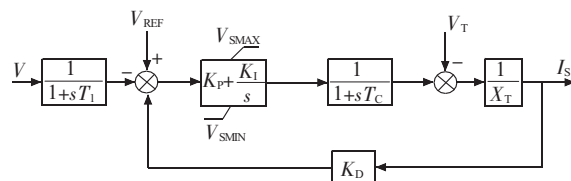


图 6 UPFC 并联无功控制部分的模型

要受到最大电流限幅的约束, 对应的模型如图 7 所示。

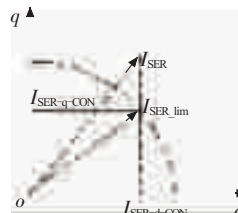


图 7 UPFC 并联部分限幅模型

UPFC 并联部分限幅模型的具体处理方法和图 5 中串联部分的处理方法有一定的差异性。该模型中, 有功电流具有较高的优先级水平, 即先保证有功电流输出, 然后将剩余的空间分配给无功电流输出, 无功电流的限幅为:

$$I_{SHUNT-q-LIM} = \sqrt{I_{SHUNT-lim}^2 - I_{SHUNT-d-CON}^2} \quad (5)$$

4 对比分析

本文提出的 UPFC 模型是适用于机电暂态仿真中较大步长条件的简化模型, 在 PSD-BPA 程序中完成了开发, MATLAB 程序中含有比较详细的 UPFC 模型, 本节主要针对两者进行对比, 验证本简化模型的合理性。采用的 MATLAB 测试系统如图 8 所示, 是一个两机系统, UPFC 与线路串联。

MATLAB 中的 UPFC 模型是比较详细的仿真模

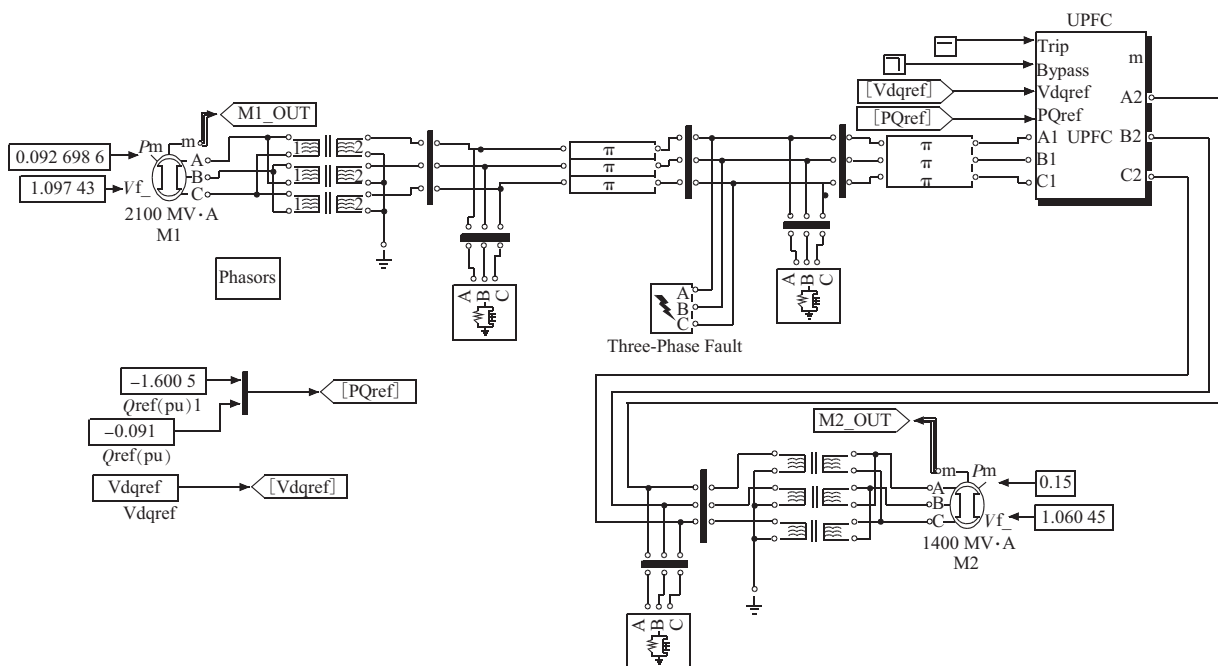


图 8 MATLAB 测试系统图

型, 并联部分分别采用母线电压和直流侧电压控制无功功率和有功功率, 控制环节中包含外环控制和比较快速的内环控制, 输出为 PWM 调制比; 串联部分采用线路功率作为控制信号, 采用闭环的 PQ 解耦控制, 输出为调制比。而本文的简化模型已经对并联部分有功控制、直流侧电压计算、调制比计算等部分进行了简化。分别采用阶跃响应、三相故障 2 种扰动形式, 验证合理性。

(1) 阶跃响应测试。设置 UPFC 串联部分的控制有功参考值、无功参考值、并联部分的电压控制参考值为如图 9 所示的阶跃信号。

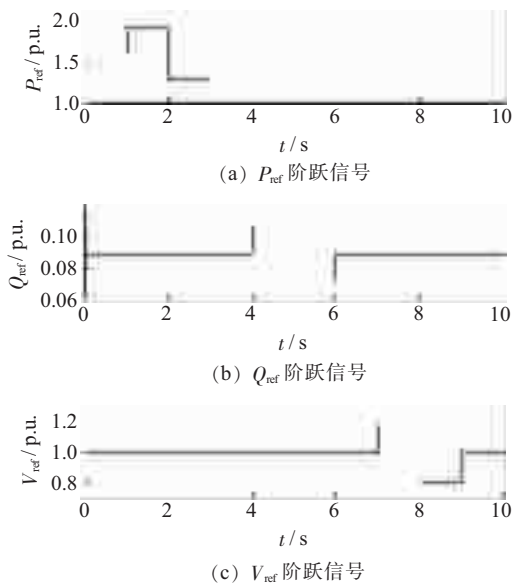


图 9 阶跃信号

MATLAB 仿真和本模型仿真的结果对比如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 简化模型在阶跃响应时与 MATLAB 的详细模型结果一致。

(2) 三相短路故障。设置了母线三相瞬时短路故

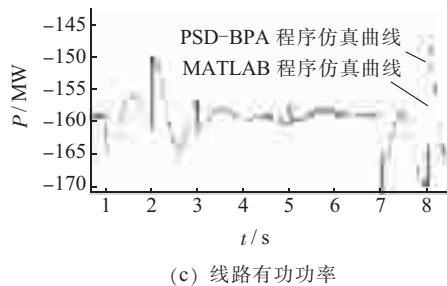
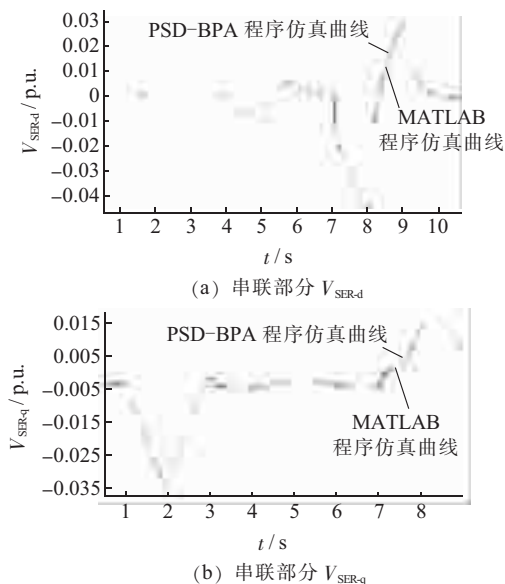


图 10 MATLAB 模型和本模型阶跃响应对比曲线

障形式, 位置如图 8 所示, 故障具体的设置为 2 s 时刻, 发生三相瞬时短路(接地电阻 5.0Ω), 2.1 s 故障消失。对比曲线如图 11 所示。

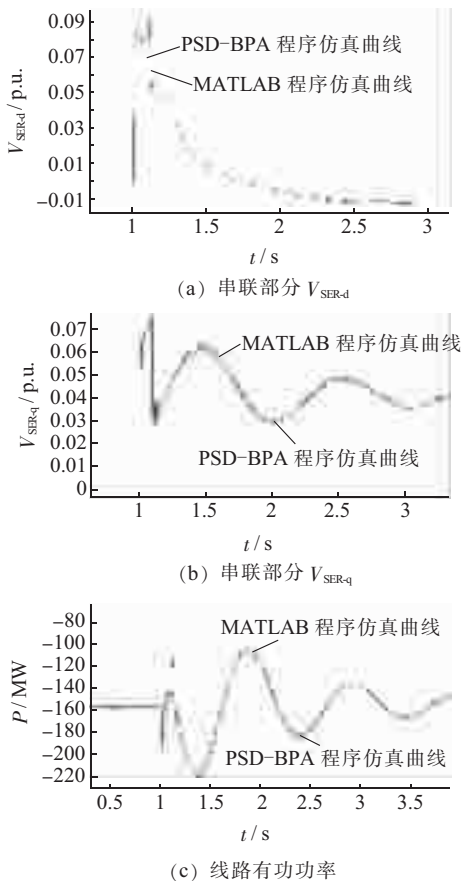


图 11 MATLAB 模型和本模型三相故障的对比曲线

从图 11 中可以看出, 对于较大的扰动, 本文提出的简化模型与 MATLAB 详细模型一致, 与前面阶跃响应结果类似, 说明了本文简化模型的有效性。

5 结束语

(1) UPFC 是灵活交流输电技术的重要组成部分, 同时具有串联控制功能和并联控制功能, 具有较强的控制能力。由于 UPFC 的复杂性, 对应的潮流和暂态稳定模型也比较复杂。

(2) 潮流计算中, UPFC 串联等效注入电压的形式在传统潮流处理方式中比较困难, 可将 UPFC 处理成为等效注入功率和 PV 节点结合的形式, 避免修改

雅可比矩阵,达到简化潮流处理方式的目的。

(3) 机电暂态仿真中,UPFC模型可忽略直流侧动态过程、内环控制等变化速度快、对后续影响小的环节,保留串联等效电压控制、并联无功控制环节、限幅等关键控制环节。

(4) 本文模型在PSD-BPA程序中完成了开发,并与MATLAB详细模型进行对比,结果表明本文提出的仿真模型具有较高的准确性。

实际系统应用中UPFC模型可能具有更加灵活的结构形式,例如江苏电网即将投运的UPFC工程,后续还需要对模型进行改进完善,提高对不同结构形式的适应性并完善实际控制和保护功能。

参考文献:

- [1] 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,2006:15-35.
- [2] SONG Y H, JHONS A T. Flexible AC Transmission System[M]. In: IEE Power and Energy Series 30. London: 1999:6-26.
- [3] 姜齐荣. 新型静止无功发生器建模及其控制的研究[D]. 北京:清华大学电机系,1997.
- [4] 赵建军. 静态同步串联补偿器机电暂态及电磁暂态特性研究[M]. 北京:中国电力科学研究院,2005:4-12.
- [5] GYUGYL L, SCHAUDER C, SAN K. Static Synchronous Series Compensator: a Solid-state Approach to the Series Compensation of Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 12, No.1, January 1997:406-417.
- [6] GYUGYL L, RLETMAN T R, EDRIS A, et al. The United Power Flow Controller: a New Approach to Power Transmission Control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 10, No.2, April 1995: 1085-1097.
- [7] KALYAN K S, ERIC J S. UPFC - Unified Power Flow Controller: Theory, Modeling, and Applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.4, October 1998:1453-1460.
- [8] EDRIS A. Design, Installation, and Operation of American Electric Power (AEP) ± 320 MV \cdot A Unified Power Flow Controller (UPFC) [J]. California, EPRI, 1999:25-32.
- [9] MANZAR R, MOHAMMED A, RICHARD G. UPFC Application on the AEP System: Planning Considerations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997:1695-1701.
- [10] Modeling of Power Electronics Equipment (FACTS) in Load Flow and Stability Programs [R]. CIGRE TF 38-01-08, 1998: 72-84.
- [11] 许海,杨尚瑾,宋晓通,等. UPFC潮流控制模型及控制特性研究[J]. 华北电力大学学报,2015,41(1):28-33.
- [12] 周洋,江道灼,陈峰,等. 基于模块化多电平换流器的限流式统一潮流控制器的设计[J]. 电力建设,2005,36(5):7-13.
- [13] 赵峰,赵雨欣,阎宏,等. 统一潮流控制器功率解耦控制策略的研究[J]. 电测与仪表,2014,51(7):39-44.
- [14] 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.

作者简介:

李海峰(1973),男,河北怀安人,研究员级高级工程师,从事电网运行和控制工作;
侯俊贤(1978),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,从事电力系统建模、仿真技术研究和软件开发工作;
王毅(1982),男,山西太原人,高级工程师,从事电力系统建模、仿真技术研究和软件开发工作;
罗建裕(1961),男,江苏无锡人,研究员级高级工程师,从事电网调度管理工作;
朱斌(1965),男,江苏镇江人,高级工程师,从事电网调度管理工作。

The UPFC Model Study in Power System Power-flow and Electro-mechanic Transient Simulation

LI Haifeng¹, HOU Junxian², WANG Yi², LUO Jianyu¹, ZHU Bin¹

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

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The UPFC is capable to control bus voltage and line power at the same time, which can improve power system stability greatly. The power-flow and electro-mechanic transient simulation model of UPFC is the basis for power system simulation. Based on the basic theory and control characteristic of UPFC, this paper proposes a method to deal with UPFC in power flow program and a simplified model for UPFC in electro-mechanic transient simulation program. In the power flow simulation, UPFC is equivalent to power injection of both ends and PV bus type. In the electro-mechanic transient simulation, some inner control sections and fast control sections are ignored which are fast and have smaller influence on the whole characteristic, so that the simplified simulation model is proposed for series power control and shunt voltage control. The simulation model is developed in PSD-BPA software and is contrast with the detailed model in MATLAB. The results show that the simplified model has good accuracy.

Key words: unified power flow controller (UPFC); power flow simulation; electro-mechanic transient simulation; simulation model