

DOI: 10.7667/PSPC171367

基于 PSS/E 的 MMC-UPFC 机电暂态仿真方法

蔡晖¹, 杨健², 彭竹奔¹, 谢珍建¹, 宋鹏程², 徐政²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力经济技术研究院, 江苏 南京 210008; 2. 浙江大学, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为满足工程规划设计的需要, 分析了基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)的等效电路, 提出一种基于 PSS/E 的机电暂态仿真方法。采用该方法进行潮流计算时, 将 UPFC 用功率注入等效, 利用交替迭代法进行求解。在动态仿真中, 将 UPFC 等效为电流源模型, 并考虑直流系统、控制器和调制等环节的作用。将该方法集成于 PSS/E 中, 分别对小系统和实际系统进行仿真。结果表明, 所提方法能够实现含 UPFC 电力系统的潮流计算, 可模拟 UPFC 的动态特性, 适用于对实际系统的仿真研究。

关键词: 统一潮流控制器; 机电暂态仿真模型; 模块化多电平换流器; PSS/E; 交替迭代法

Electromechanical transient simulation method for MMC-UPFC in PSS/E

CAI Hui¹, YANG Jian², PENG Zhuyi¹, XIE Zhenjian¹, SONG Pengcheng², XU Zheng²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China;
2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to meet the needs of project planning and design, the equivalent circuit of the Unified Power Flow Controller (UPFC) based on the Modular Multilevel Converter (MMC) is analyzed. Then, an electromechanical transient simulation method based on PSS/E is proposed. The power injection model of the UPFC and the alternating iteration method are used in the load flow calculation. To realize transient simulations, the UPFC is represented by current sources. The direct current system, controllers and the modulation of the UPFC are taken into consideration. By integrating this method in PSS/E, both a small system and a real system are tested. The results show that the proposed method, which is suitable for real power systems.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. "Research on Long-term Dynamic Stability Characteristics and Simulation Technology of Flexible Transmission Equipment including UPFC".

Key words: UPFC; electromechanical transient model; MMC; PSS/E; alternating iteration method

0 引言

统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)是目前功能最为全面的柔性交流输电装置(Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS)之一, 可以起到平衡系统潮流分布, 提高输电能力等作用。国外在 1998 年至 2004 年间投运了 3 套基于三电平电压源换流器的 UPFC 工程, 我国于 2015 年末投运了世界首套基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的 UPFC 工程。与基于 MMC 的统一潮流控制器(下文简称

为 MMC-UPFC)相比, 国外基于三电平电压源换流器的 UPFC 有串联器件静态和动态均压问题, 同时具有占地面积大、损耗大、控制不够灵活等缺点^[1]。因此, 在高电压、大容量输电领域 MMC-UPFC 更具技术优势。

目前关于 MMC-UPFC 的研究多基于电磁暂态仿真, 研究其内部动态特性^[1-2]、控制策略^[3-4]、保护方案^[5-6]等。而规划 UPFC 的接入地点和容量、制定系统级控制策略、分析接入系统后对系统的影响等涉及大系统、长过程的计算, 采用机电暂态仿真更为合适。机电暂态仿真需要解决两个问题, 一是确定 UPFC 的静态模型, 给出含 UPFC 的潮流计算方法; 二是研究 UPFC 的动态模型及其与系统在动态仿真中的接口。动态仿真以潮流计算结果作为初

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目“含 UPFC 等柔性输电设备长过程动态稳定特性及仿真技术研究”

始运行点, 因此, 两者应相互适应。

含 UPFC 的潮流计算方法可大致分为统一迭代法和交替迭代法。统一迭代法^[7-8]需要增加新的 UPFC 状态变量, 并修改雅克比矩阵, 对算法改动较大; 交替迭代法^[9-11]常将 UPFC 等效为附加的功率注入, 方便在已有程序中集成。文献[11]给出了适用于 PSS/E 的潮流计算方法, 但没有考虑与动态仿真的配合问题。

动态仿真方面, 文献[12]建立了考虑直流电容动态的基于电压源换流器的 UPFC 模型, 并指出计及直流电容充放电过程的必要性。文献[1]和文献[13]建立了 MMC-UPFC 的开关周期平均模型, 该模型适用于分析 UPFC 的内部动态特性。总体而言, 针对 MMC-UPFC 建模的研究相对较少。文献[14]针对包含 UPFC 的单机无穷大系统, 给出了一种将差分方程与代数方程联立求解的机电暂态仿真方法。文献[15]给出了一种含 UPFC 的电力系统动态混合仿真方法, 文献[16]提出了基于 RTDS 的数模混合仿真方法。对包含 UPFC 的机电暂态仿真方法的研究还不够完善。

本文首先分析 MMC-UPFC 的静态等值电路, 基于交替迭代法给出适用于 PSS/E 的潮流计算方法。之后分析 MMC-UPFC 的动态仿真模型及与系统的接口, 给出动态仿真方法。最后, 通过仿真算例分析 MMC-UPFC 的动态特性, 并说明所提仿真方法的合理性和有效性。

1 潮流计算方法

考虑如图 1 所示 MMC-UPFC 系统结构。UPFC 包含 2 个 MMC 换流器, 串联换流器通过串联变压器连入线路 $L-M$ 中(L 点和 K 点为串联变压器接入点), 并联换流器经过并联变压器接到母线 N 上。工程中常将 UPFC 并联变压器也接于母线 L 上, 这种结构可以看作是图 1 中一般结构的特例。

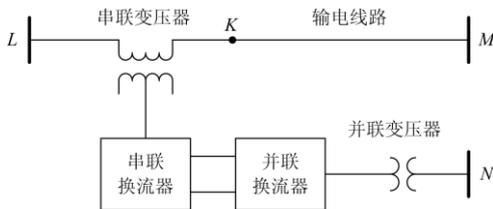


图 1 UPFC 系统结构图

Fig. 1 Structure of UPFC system

在实际应用中, 通常采用 UPFC 串联侧换流器控制线路 $L-M$ 上流过的有功和无功潮流, 采用并联侧换流器控制母线 N 的电压幅值, 同时维持 UPFC

的直流电压。此时可以将 UPFC 用图 2 所示的功率注入源进行等效。

如图 2 所示, 将并联换流器和串联换流器分别编号为 1 和 2。UPFC 用 L 、 K 、 N 三点的注入功率代替。设注入到 K 点的功率为控制目标, 即有

$$\begin{cases} P_{LK} = P_C \\ Q_{LK} = Q_C \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_C 、 Q_C 分别为有功、无功控制目标。

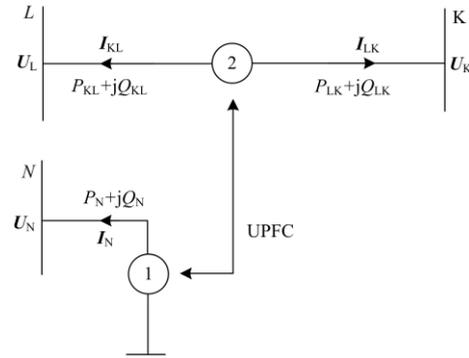


图 2 UPFC 功率注入源模型

Fig. 2 Power injection model of UPFC

此时, 注入 L 点的电流为

$$I_{KL} = -I_{LK} = -\left[\frac{(P_C + jQ_C)}{U_K} \right]^* \quad (2)$$

注入到 L 点的潮流为

$$P_{KL} + jQ_{KL} = U_L (I_{KL})^* \quad (3)$$

注入到串联换流器的有功功率为

$$P_{se} = -(P_{KL} + P_{LK}) \quad (4)$$

可用注入换流器的功率乘上一定的比例估算并联换流器和串联换流器的损耗。假设该比例系数为 a , 且 $a \in [0, 1]$, 则串联换流器注入到直流网络的功率为

$$P_{dc2} = \begin{cases} (1-a)P_{se}, & P_{se} \geq 0 \\ (1+a)P_{se}, & P_{se} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

为计算 UPFC 注入到 N 点的有功功率 P_N , 需要对直流网络进行分析。假设正负极直流线路参数对称, 则稳态下 UPFC 的直流侧等效电路如图 3 所示。

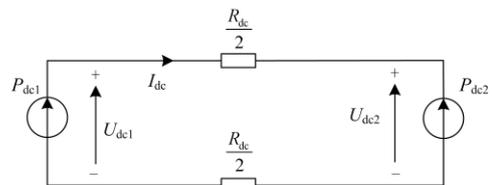


图 3 UPFC 直流侧稳态电路

Fig. 3 Steady state circuit of UPFC DC system

图中, P_{dc1} 和 P_{dc2} 分别为并联侧换流器和串联侧换流器注入到直流网络的功率, 直流电流正方向选取为从并联侧换流器正极流向串联侧换流器正极。

并联侧换流器直流端电压为直流电压设定值, 即有

$$U_{dc1} = U_{dcref} \quad (6)$$

根据式(5)、式(6), 求解直流网络可得 P_{dc1} 。进一步, 根据式(7)可以求得并联换流器注入系统的有功功率为

$$P_N = \begin{cases} -P_{dc1} / (1-a), P_{dc1} \geq 0 \\ -P_{dc1} / (1+a), P_{dc1} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

采用交替迭代法求解系统潮流。由于 UPFC 并联侧控制 N 点电压或者控制注入到 N 点的无功功率, 因此迭代过程中 Q_N 不必计算。每次迭代时将 L 点和 K 点等效为 PQ 节点, 将 N 点等效为 PV 或 PQ 节点, 根据上面推导的公式求出 UPFC 对 L 、 K 、 N 三点的注入功率。求解过程中, 交替计算系统状态和 UPFC 的等效注入功率, 直至迭代收敛。

2 动态仿真方法

2.1 整体思路

MMC-UPFC 整体由并联侧和串联侧组成。在动态仿真过程中, 并联侧和串联侧都等效为注入电流源。在 PSS/E 中构建的 MMC-UPFC 并联侧仿真模型如图 4 所示。

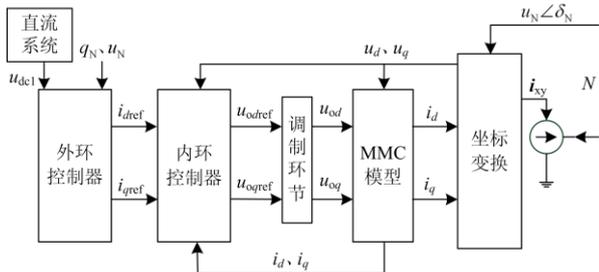


图 4 MMC-UPFC 并联侧模型

Fig. 4 Model of MMC-UPFC shunt converter

MMC-UPFC 并联侧模型包含直流系统、外环控制器、内环控制器和 MMC 模型等。UPFC 并联换流器的外环控制器一般用来控制直流电压 u_{dc1} 和注入交流母线的无功功率 q_N (或者控制交流母线电压 u_N)。外环控制器生成内环控制器的电流指令 i_{dref} 、 i_{qref} , 内环控制器生成 MMC 换流器的差模电压参考值 u_{odref} 和 u_{oqref} 。经过调制环节和 MMC 模型得到实际输出电流 i_d 、 i_q , 再经过坐标变换后得到从交流系统流入 UPFC 并联侧的电流 i_{xy} 。

在 PSS/E 中构建的 MMC-UPFC 串联侧仿真模型如图 5 所示。

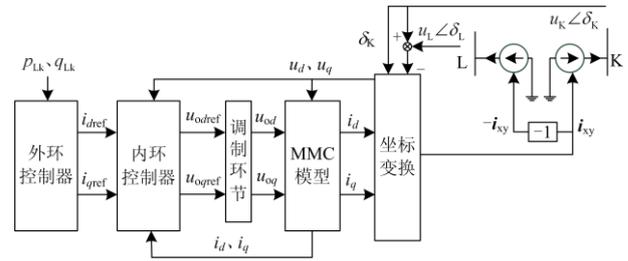


图 5 MMC-UPFC 串联侧模型

Fig. 5 Model of MMC-UPFC series converter

如图 5 所示, MMC-UPFC 串联侧模型结构与并联侧基本相同。区别在于, UPFC 串联侧外环控制线路的有功和无功潮流。UPFC 串联侧对交流系统而言等效为两个电流源, 两者注入交流系统的电流互为相反数。

开始动态仿真之前, 根据潮流计算结果对上述模型进行动态初始化。在动态仿真过程中, 根据系统运行状态和 UPFC 模型, 通过数值计算可以得到 UPFC 对系统的注入电流。之后 PSS/E 根据注入电流求解网络方程, 得到新的系统运行状态。在新的系统运行状态下, 更新 UPFC 的注入电流。如此循环, 实现 UPFC 的机电暂态仿真。

2.2 坐标变换矩阵

在建立 UPFC 模型时, 为实现有功量和无功量的解耦控制, 通常选择在 dq 坐标系下建模, 而机电暂态仿真中系统的电压、电流量均为 xy 坐标系下的值。因此, 在 UPFC 建模中首先要考虑两者之间的坐标变换矩阵。

xy 坐标系的量 A_{xy} 与 dq 坐标系的量 A_{dq} 之间变换矩阵如下。

$$A_{dq} = T A_{xy} \quad (8)$$

$$T = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix}$$

逆变换矩阵如下。

$$A_{xy} = T^{-1} A_{dq} \quad (9)$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix}$$

式(8)、式(9)中的 δ 为 q 轴超前 x 轴的角度。

在如图 2 所示的 UPFC 结构中, 并联侧 $U_N = U_N \angle \delta_N$, 则

$$\begin{bmatrix} U_{Nd} \\ U_{Nq} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} U_{Nx} \\ U_{Ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_N \sin(\delta - \delta_N) \\ U_N \cos(\delta - \delta_N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

为方便功率计算与解耦控制, 选取 q 轴超前 x

轴的初始值 $\delta_0 = \delta_N + \frac{\pi}{2}$ 。此时,若假设 MMC 的 dq

轴与其并联母线电压以相同的速度旋转(即 MMC 输出电压与并联母线电压之间的相角保持不变),则总有 $\delta = \delta_0$, 且

$$\begin{bmatrix} U_{Nd} \\ U_{Nq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_N \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

采用标幺值计算时,UPFC 并联侧注入 N 点的视在功率为

$$\tilde{S}_N = P_N + jQ_N = \mathbf{U} \mathbf{I}_N^* = U_{Nd} I_{Nd} - jU_{Nd} I_{Nq} \quad (12)$$

式中, I_{Nd} 和 I_{Nq} 分别为 \mathbf{I}_N 在 d 、 q 坐标下的分量。

可见,当 N 点电压幅值不变时, I_{Nd} 和 I_{Nq} 可以分别控制 P_N 和 Q_N 。

对串联侧,设 $\mathbf{U}_{KL} = \mathbf{U}_K - \mathbf{U}_L = U_{KL} \angle \delta_{KL}$ 。正方向选取如图 6 所示。

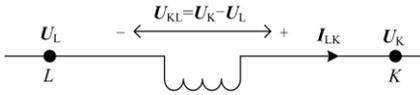


图 6 UPFC 串联侧正方向选取示意图

Fig. 6 Diagram for the positive direction selection of the UPFC series branch

此时有:

$$\begin{bmatrix} U_{KLd} \\ U_{KLq} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} U_{KLx} \\ U_{KLy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{KL} \sin(\delta - \delta_{KL}) \\ U_{KL} \cos(\delta - \delta_{KL}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

为方便功率计算与解耦控制, d 轴选为与 \mathbf{U}_K 方

向相同,即令 $\delta_0 = \delta_K + \frac{\pi}{2}$ 。同样地,若 MMC 输出电压与 \mathbf{U}_K 保持同步旋转,则总有 $\delta = \delta_0$ 。此时, \mathbf{U}_K dq 分解后的结果如式(14)。

$$\begin{bmatrix} U_{Kd} \\ U_{Kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_K \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

注入到 K 点处的功率为

$$\tilde{S}_K = P_{LK} + jQ_{LK} = \mathbf{U}_K \mathbf{I}_{LK}^* = U_{Kd} I_{LKd} - jU_{Kd} I_{LKq} \quad (15)$$

可见, K 点电压幅值不变时, I_{LKd} 和 I_{LKq} 可以分别控制注入 K 点的有功和无功潮流。

2.3 MMC 模型

对 MMC-UPFC, 其并联侧和串联侧都基于 MMC 换流器。以 UPFC 并联侧 MMC 换流器为例,其电路结构如图 7 所示。

图中 L_T 为换流变等效电感, L_0 为 MMC 桥臂电

感, R_0 为桥臂等效电阻, O 点为虚拟接地点。

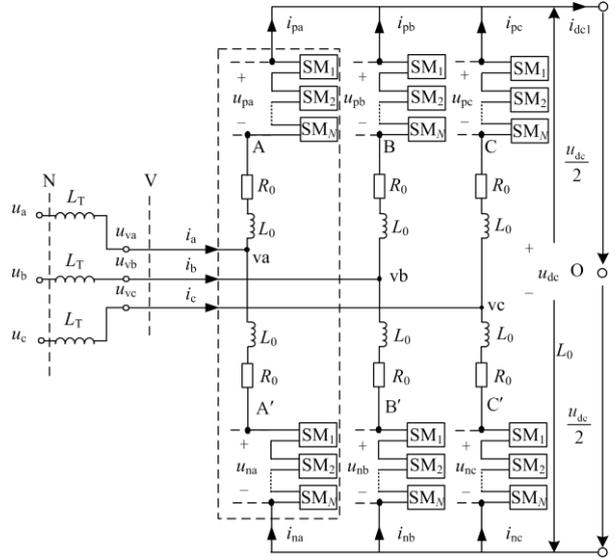


图 7 MMC 电路结构

Fig. 7 Circuit structure of MMC

参考文献[17],可知 MMC 在 dq 坐标下的数学模型为

$$\begin{cases} u_d - u_{od} = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q \\ u_q - u_{oq} = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d \end{cases} \quad (16)$$

式中: ω 为交流系统角频率; u_d 、 u_q 为 N 点电压的 dq 轴分量; u_{od} 、 u_{oq} 为 MMC 差模电压的 dq 轴分量(MMC 差模电压定义见文献[17]); i_d 、 i_q 为注入 MMC 的交流电流的 dq 轴分量; R 为换流器等效电阻; L 为换流变电感与桥臂等效电感之和,有

$$\begin{cases} R = \frac{R_0}{2} \\ L = L_T + \frac{L_0}{2} \end{cases} \quad (17)$$

根据式(16), MMC 模型可用图 8 表示。

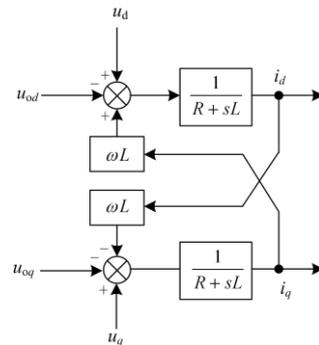


图 8 MMC 模型框图

Fig. 8 Block diagram of MMC model

图中 s 为拉普拉斯算子。

串联侧换流器等效模型与并联侧等效模型类似, 差别在于: 对并联侧, u_d 和 u_q 由 U_N 分解得到, 对串联侧, 则由 U_{KL} 分解得到。此外, 对并联侧, 根据上述电路得到的 i_d 和 i_q 为注入到换流站的电流; 对串联侧, 根据上述电路得到的 i_d 、 i_q 与图 6 中 I_{LK} 的 dq 轴分量相等。

2.4 直流系统等效电路

直流线路采用 π 型电路表示时, UPFC 直流侧等效电路如图 9 所示。

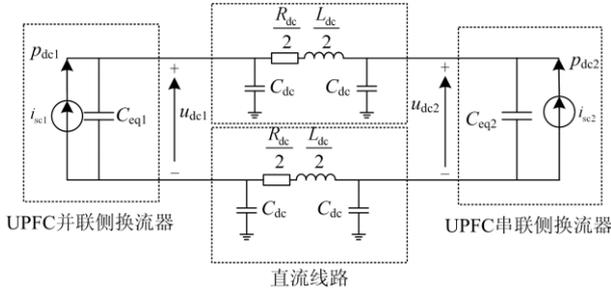


图 9 UPFC 直流等效电路

Fig. 9 Equivalent circuit of the UPFC DC system

其中, p_{dc1} 和 p_{dc2} 分别为并联换流器和串联换流器注入到直流网络的有功功率, 可由注入到换流器的功率减去换流器损耗得到。直流线路采用 π 型等效电路, 且假设正负极直流线路参数对称。MMC 换流器等效电容 C_{eqi} ($i=1$ 或 2) 可以依据等效前后每个时刻三相电容的储能之和相等进行确定。假设换流器 i 单桥臂子模块个数为 N_{SMi} , 每个子模块电容为 C_{SMi} , 则有^[18]

$$C_{eqi} = \frac{6}{N_{SMi}} C_{SMi} \quad (18)$$

根据对称性, 上述等效电路可以简化为图 10 所示电路。

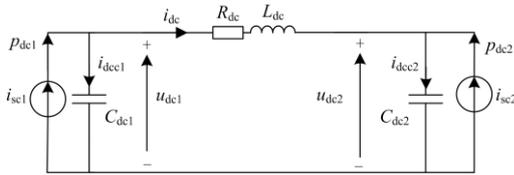


图 10 UPFC 直流简化电路

Fig. 10 Simplified circuit of the UPFC DC system

在图(10)中, 有

$$\begin{cases} C_{dc1} = C_{eq1} + \frac{C_{dc}}{2} \\ C_{dc2} = C_{eq2} + \frac{C_{dc}}{2} \end{cases} \quad (19)$$

根据图 10, 可得直流侧动态方程为

$$\begin{cases} i_{dc1} = C_{dc1} \frac{du_{dc1}}{dt} \\ i_{dc2} = C_{dc2} \frac{du_{dc2}}{dt} \\ u_{dc1} - u_{dc2} = i_{dc} R_{dc} + L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} \end{cases} \quad (20)$$

实际工程中串联侧和并联侧设置在同一站内时, 直流线路很短。若忽略直流线路参数, 则潮流计算中直流线路损耗为 0, 动态中可以进一步将两侧等效电容进行合并, 根据两侧直流功率计算直流电流和直流电压。

2.5 控制器模型

由前述分析可知, 通过控制注入到 K 点和 N 点的 dq 轴电流, 可以控制 UPFC 串联侧和并联侧与系统交换的有功和无功功率。因此, 为实现 UPFC 预设的控制目标, 可以采用如图 11 和图 12 所示的 PI 控制器作为其外环控制器。

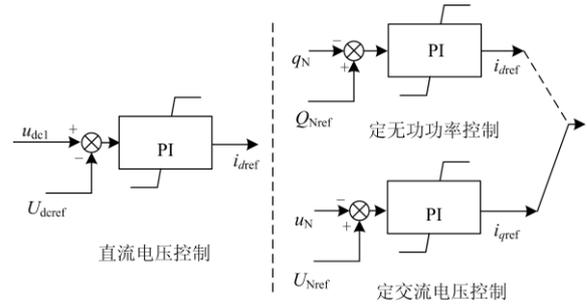


图 11 并联侧外环控制器

Fig. 11 Outer-loop controller of the UPFC shunt converter

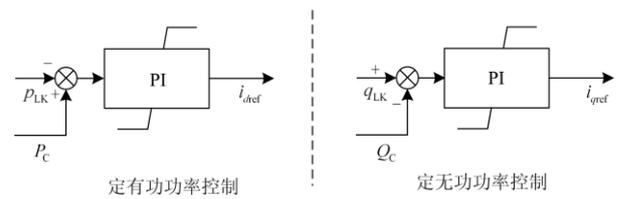


图 12 串联侧外环控制器

Fig. 12 Outer-loop controller of the UPFC series converter

外环控制器根据 UPFC 的控制目标生成串联侧和并联侧电流 dq 轴指令值 i_{dref} 、 i_{qref} 。为使换流器输出电流跟踪 i_{dref} 和 i_{qref} , 串联侧和并联侧换流器都采用内环电流控制器得到 MMC 的差模电压指令值。

内环电流控制器如图 13 所示, 其输入为换流器交流侧电压、电流的 dq 轴实际值以及电流的 dq 轴参考值, 输出为 MMC 差模电压 dq 轴参考值。

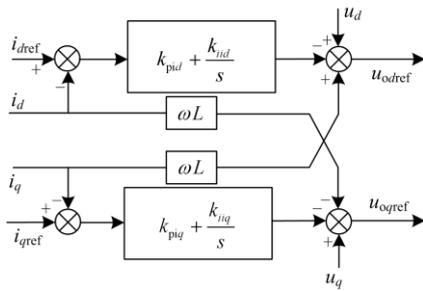


图 13 内环电流控制器

Fig. 13 Inner-loop controller of the UPFC

MMC 通过调制环节控制其实际差模输出电压 u_{od} 、 u_{oq} 跟踪 u_{odref} 、 u_{oqref} 。为一般性地模拟调制环节的控制效果^[19]，可将调制环节用一阶延时代替，如图 14 所示。

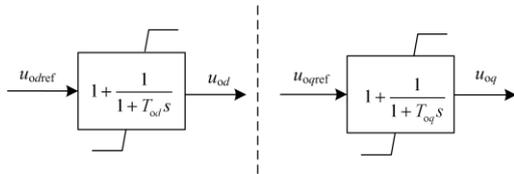


图 14 调制环节

Fig. 14 Modulation model of the UPFC

3 算例分析

3.1 小系统算例

(1) 潮流计算

含 UPFC 的算例系统结构如图 15 所示。图中竖直的加粗线为母线，母线右上方数字为母线号，右下方数字分别为母线电压标么值和实际值(单位 kV)。线路上方和下方数字分别为注入线路的有功功率(单位 MW)和无功功率(单位 Mvar)。

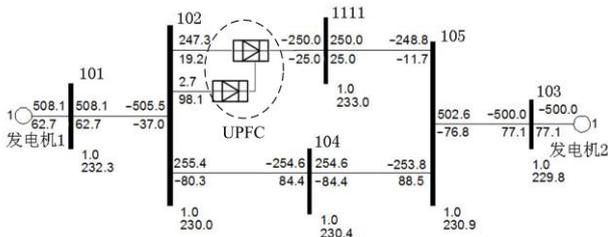


图 15 算例系统结构图

Fig. 15 Diagram of the test system

UPFC 并联侧接到母线 102 上，控制母线 102 的电压幅值为 1.0 p.u.，同时控制 UPFC 直流电压为 100 kV。UPFC 串联侧接入母线 102 与母线 1111 之间，控制注入母线 1111 的潮流为 250.0 MW+j25.0 Mvar。

稳态时，潮流计算结果如图 15 所示。此时，

串联侧实现了潮流控制目标，并联侧吸收 2.7 MW 有功功率，以维持直流电压，同时吸收一定的无功功率，维持母线 102 的电压为 1.0 p.u.。

(2) UPFC 阶跃响应

稳态运行至 1 s 时，改变 UPFC 串联侧有功功率控制目标为 300 MW，运行至 5 s 时，改变串联侧无功功率控制目标为 50 Mvar。控制目标的变化曲线如图 16。其中实线为有功控制目标，虚线为无功控制目标。

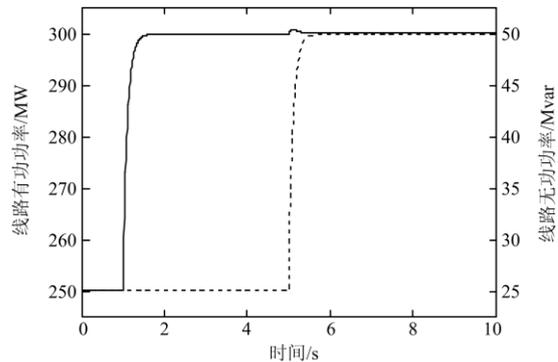


图 16 控制目标的变化曲线

Fig. 16 Transient response curves of UPFC control targets

由图可见，当有功和无功控制目标改变时，UPFC 可以使线路潮流很快地跟踪控制目标变化，控制过程快速、平稳，控制性能优异。同时可以看到，当有功(或无功)控制目标变化时，线路无功(或有功)潮流会受到影响，产生波动，但变化很小，且可以很快恢复到设定的控制值。这说明在上述控制策略下，UPFC 串联侧的有功和无功基本可以实现解耦控制。

在上述过程中，UPFC 并联侧交流母线电压和直流电压的变化如图 17 所示，其中直流电压变化为实线，交流母线电压变化为虚线。

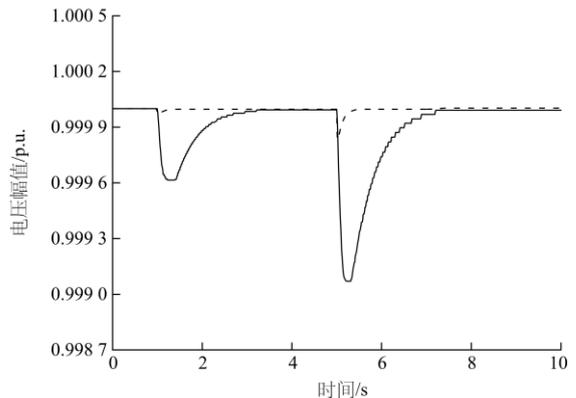


图 17 交流电压和直流电压变化曲线

Fig. 17 Transient response curves of voltages

由图 17 可见, 当 UPFC 串联侧有功和无功控制目标改变时, UPFC 并联侧控制目标会受到影响, 但影响很小。这说明采用上述控制方式, UPFC 串联侧和并联侧的控制实现了解耦, 可以独立控制。

上述过程中, UPFC 的串联侧和并联侧输出电流 d 、 q 轴分量、差模电压 d 、 q 轴分量的变化分别如图 18、图 19 所示。

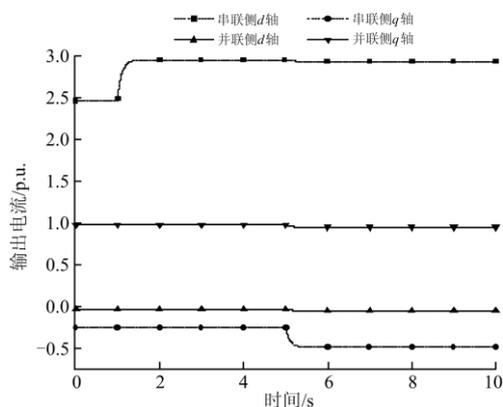


图 18 输出电流变化曲线

Fig. 18 Transient response curves of UPFC output current

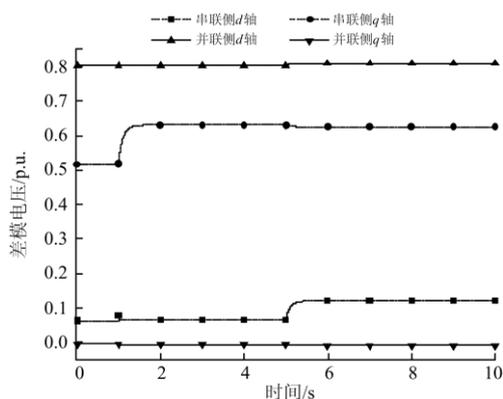


图 19 差模电压变化

Fig. 19 Transient response curves of UPFC differential mode voltages

由图可见, 在串联侧控制目标发生变化时, 并联侧差模电压的 d 、 q 轴分量变化较小; 对应地, 并联侧输出电流的 d 、 q 轴分量变化也较小, 这进一步说明了 UPFC 串联侧和并联侧的控制耦合度很小。同时可以看到, 在串联侧控制目标发生变化时, 串联侧输出电流的 d 、 q 轴分量分别与串联侧有功和无功潮流的变化相对应, 变化方式与前文的分析相符。并联侧控制目标阶跃变化时, 也可以得到类似结论。

3.2 实际系统算例

以某城市电网为例, 为解决该地区潮流分布不均、输电能力不足的问题, 加装 UPFC 装置。局部

电网结构如图 20 所示。UPFC 并联侧接于母线 N , 串联侧接于线路 $L-M$ 中靠近母线 L 处。

UPFC 投入前, 北部断面潮流较轻, 约为 600 MW。南部断面潮流重, 并会导致其 $N-1$ 校核不能通过。UPFC 投入后, UPFC 通过控制线路 $L-M$ 的潮流, 提升北部断面潮流至 750 MW, 保证南部断面满足 $N-1$ 校核。

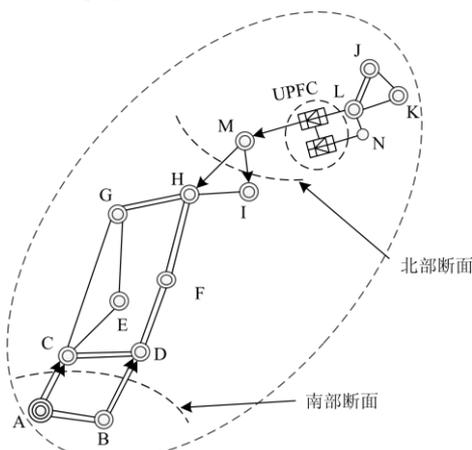


图 20 实际电网局部结构示意图

Fig. 20 Schematic diagram of an urban network

在该运行方式下, 当北部断面线路 $N-1$ (无故障跳开) 时, UPFC 降低北部断面潮流到 350 MW, 保证剩余的一条线路不过载。仿真过程如下: 0 s 时潮流自然分布, 2 s 时 UPFC 开始调节潮流; 5 s 时 $M-I$ 线路无故障跳开。在此过程中, 北部断面的潮流变化和 UPFC 并联站交流母线电压变化如图 21 和图 22 所示。

由图可见, 该 UPFC 装置可以多次、快速地控制线路潮流, 并维持并联侧换流站交流母线电压, 能够起到均衡断面潮流、防止故障下线路过载的预期目标。同时该仿真算例表明, 本文所提出的仿真方法可以在实际系统中应用, 从而为系统规划设计提供依据。

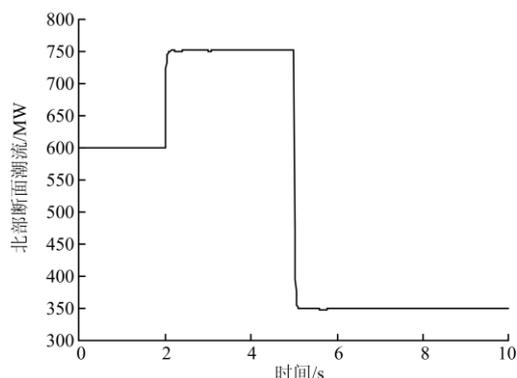
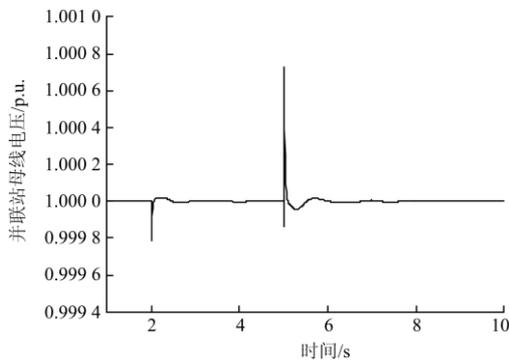


图 21 北部断面有功潮流

Fig. 21 Curves of power flow at the north transmission interface

图 22 交流母线 N 的电压Fig. 22 Voltages of bus N

4 结论

针对 MMC-UPFC, 本文提出了在 PSS/E 中进行机电暂态仿真的方法, 总结如下:

(1) 推导了 MMC-UPFC 的静态等效电路, 提出了含 UPFC 系统的潮流计算方法。计算过程中将 UPFC 等效为功率注入, 对 UPFC 和系统其余部分交替迭代, 求解整个系统的运行状态。

(2) 构建了 MMC-UPFC 的动态仿真模型。仿真模型中, 将 UPFC 每个换流器等效为注入电流源, 采用双环解耦控制策略, 并考虑了直流系统和调制环节的影响。该模型可以方便地集成到仿真软件 PSS/E 中, 实现大系统的机电暂态仿真。

(3) 通过仿真算例验证了上述动态仿真方法在实际系统中的适用性。仿真结果表明, 采用上述方法可以很好地实现预定控制目标, UPFC 内部变量的状态变化与理论相符, 可以在实际系统中应用, 为系统规划设计提供参考。

虽然本文提出的 MMC-UPFC 机电暂态仿真方法是基于仿真软件 PSS/E 的, 但对其他机电暂态仿真软件也具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 宋洁莹, 冯献强, 崔福博, 等. MMC-UPFC 动态建模及内部特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊): 67-75.
SONG Jieying, FENG Xianqiang, CUI Fubo, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation research of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S): 67-75.
- [2] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. MMC-UPFC 接地设计及其站内故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1628-1636.
CUI Fubo, GUO Jianbo, JING Ping, et al. The grounding design and internal fault characteristic of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1628-1636.
- [3] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于 RTDS 仿真的 MMC_UPFC 串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 56-62.
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC_UPFC indirect current control strategy based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-62.
- [4] 张振华, 江道灼. 基于 MMC 拓扑的 UPFC 控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 73-77.
ZHANG Zhenhua, JIANG Daozhuo. Control strategy simulation of UPFC based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 73-77.
- [5] 郑涛, 吴丹, 宋洁莹. 基于 MMC 的统一潮流控制器交流侧故障特性及保护方案[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3570-3577.
ZHENG Tao, WU Dan, SONG Jieying. The AC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on MMC[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3570-3577.
- [6] 孔祥平, 李鹏, 黄浩声, 等. 统一潮流控制器对线路纵联保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 14-21.
KONG Xiangping, LI Peng, HUANG Haosheng, et al. Impact analysis of unified power flow controller on transmission line pilot protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 14-21.
- [7] 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.
- [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 systems 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 Liwei, et al. A three-bus power injection method of UPFC and its engineering application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 145-151.
- [10] 董良英, 房大中, 林旭军. 含统一潮流控制器的电力系统新型潮流算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(2): 8-10.
DONG Liangying, FANG Dazhong, LIN Xujun. A new technology for power flow calculation of power system with UPFC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(2): 8-10.
- [11] FUERTE-ESPUIVEL C R, ACHA E, AMBRIZ-PEREZ H. A comprehensive Newton-Raphson UPFC model for the quadratic power flow solution of practical power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 102-109.
- [12] 黄振宇, 倪以信, 陈寿孙. 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.
HUANG Zhenyu, NI Yixin, CHEN Shousun. Realization of UPFC dynamic model in dynamic analysis of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 26-30.
- [13] 崔福博, 宋洁莹, 周飞, 等. 基于 MMC 的统一潮流控制器建模方法及其内部动态特性仿真分析[J]. 智能电网, 2014, 2(12): 1-12.
CUI Fubo, SONG Jieying, ZHOU Fei, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation analysis of UPFC based on MMC[J]. Smart Grid, 2014, 2(12): 1-12.
- [14] 颜伟, 朱继忠, 孙洪波, 等. 统一潮流控制器的控制器设计与暂态仿真研究[J]. 电网技术, 1999, 23(7): 15-19.
YAN Wei, ZHU Jizhong, SUN Hongbo, et al. Controller design and transient simulation study of UPFC[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 15-19.
- [15] 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.
LIU Haoming, ZHU Haojun, YAN Zheng, et al. Study on interface algorithm for power system transient stability hybrid-model simulation with UPFC device[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 1-7.
- [16] 周飞, 陆振纲, 于弘洋, 等. 统一潮流控制器多时间尺度混合实时数字仿真[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2848-2855.
ZHOU Fei, LU Zhengang, YU Hongyang, et al. Research on multiple time scale hybrid real-time digital simulation and testing of unified power flow controller[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2848-2855.
- [17] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 102-104.
- [18] LIU Sheng, XU Zheng, HUA Wen, et al. Electromechanical transient modeling of modular multilevel converter based multi-terminal HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 72-83.
- [19] 刘昇, 徐政, 唐庚, 等. VSC-HVDC 机电暂态建模及仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1672-1677.
LIU Sheng, XU Zheng, TANG Geng, et al. Electromechanical transient modeling and simulation for voltage source converter based HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1672-1677.

收稿日期: 2017-09-13; 修回日期: 2017-11-24

作者简介:

蔡 晖(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划技术; E-mail: caihui300@hotmail.com

杨 健(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为大规模交直流电力系统分析; E-mail: yangjian_zju@zju.edu.cn

徐 政(1962—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风电发电技术与风电场并网技术相关研究。E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn

(编辑 张爱琴)