

DOI: 10.7667/PSPC160269

基于 RTDS 仿真的 MMC_UPFC 串联侧间接电流控制研究

庄良文¹, 张彦兵¹, 荆雪记², 李志勇¹, 贾德峰¹, 姚致清¹

(1. 许昌开普检测技术有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了更便捷地进行 MMC_UPFC 的仿真建模, 采用间接电流控制方案实现了 UPFC 串联侧换流器的简化、有效控制。基于 MMC_UPFC 系统的相量模型, 详细推导了该控制策略的仿真建模方法。为提升仿真参数的真实性, 参照国内某 UPFC 示范工程技术参数, 在 RTDS 的小步长(ns 级)模块中, 设计了恒压移相控制、有功无功潮流控制及电网扰动下 UPFC 的动态响应等多个试验算例进行仿真。试验结果表明, 该控制策略能够使 MMC_UPFC 系统快速、有效地跟随控制指令, 并呈现良好的调压移相、潮流控制等调节性能。

关键词: 统一潮流控制器; 模块化多电平; 串联侧控制; RTDS

Simulation research of MMC_UPFC indirect current control strategy based on RTDS

ZHUANG Liangwen¹, ZHANG Yanbing¹, JING Xueji², LI Zhiyong¹, JIA Defeng¹, YAO Zhiqing¹

(1. Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: A simplified control method for the series side of MMC_UPFC is realized by adopting indirect current control scheme for building simulation model more conveniently. Based on the MMC_UPFC system's phasor model, the process for modeling and simulation of the simplified control strategy is deduced. Some simulation tests are built on the RTDS's microsecond-level module based on one demonstration project of UPFC such as constant voltage phase shift control, active and reactive power flow control, and UPFC dynamic response under power grid disturbance, etc. Simulation results show that the simplified control strategy can make the MMC_UPFC system follow the control instruction fast and effectively and present regulation performance like good voltage control and phase shift and power flow control, etc.

Key words: UPFC; MMC; series part control; RTDS

0 引言

UPFC 是一种兼具串、并联型 FACTS(柔性交流输电系统)装置特性, 具有调压、移相、串补、控制线路潮流等功能的 FACTS 装置。可以充分挖掘现有电网潜力, 定向、定量控制线路潮流分布、改善弱阻尼互联系统的低频振荡、解决输电线路融冰问题、为大负荷受端电网提供无功支持等^[1-5]。

虽然 UPFC 功能强大、性能优异, 但目前世界上投运工程却是寥寥: 第一套 UPFC 工程于 1998 年美国投运; 第二套于 2003 年韩国投运; 第三套南京西环网 UPFC 工程于 2015 年底投运; 2016 年上海 UPFC 示范工程也即将投运。究其原因: UPFC 控制系统较为复杂、全控型器件所组成的换流器容量较小, 且电网发展模式较为粗放。上述现状导致 UPFC 投运效益低下, 工程推广有限。

近年来, 国家电网公司大力推进跨省、跨区之间的电力交易, 以期实现大范围内能源的资源优化配置, 提升电网的整体经济效益。而大范围的电网互联运行, 需要采取有效手段来提高电网运行稳定性和可靠性^[6]。MMC 换流器具有电压和容量易于拓展、无滤波器等众多优点, 采用 MMC 换流器的 UPFC 装置突破了常规换流器容量限制的瓶颈, 将具有更好的实际工程效益^[1-3]。随着电网的进一步深化改造, MMC_UPFC 必将逐步在电力工程中发挥其强大的优势。

文献[6]重点介绍了基于 RTDS 的 ns-FPGA 仿真板卡进行 UPFC 混合仿真步长的试验, 并未对 UPFC 串联侧控制策略作描述。文献[7]以已投运的示范工程为背景, 提出一种具有线路功率越限控制功能的 UPFC 系统级控制策略, 并进行了试验论证。文献[8]围绕 MMC_UPFC 进行建模分析, 并基于 RTDS

做了动态特性仿真。文献[9]基于对 UPFC 的潮流控制特性分析, 绘制了各部分功率的三维运行曲面, 并基于一台 15 kVA 的 UPFC 试验系统, 验证了串联侧采用交叉耦合控制的可行性。上述文献的 UPFC 控制部分, 大多采用双闭环交叉解耦控制模式, 参数较多、结构复杂, 给 UPFC 的建模与控制带来一定不便。

基于 UPFC 串联侧基本原理和常规 VSC 换流器间接电流控制策略方案以及 MMC 换流器的特性, 实现了间接电流控制在 MMC_UPFC 串联侧换流器建模中的应用。根据系统幅值相量模型, 推导并建立了详细的仿真控制模型。在实时仿真器 RTDS 中搭建小步长(分辨率为 ns)仿真模型, 试验结果验证了 MMC_UPFC 系统所采用的串联侧间接电流策略的可行性与有效性。

1 MMC_UPFC 工作原理与串联侧直接电流控制

1.1 MMC_UPFC 的工作原理

两个交流系统的潮流传输表达式^[10-11]为式(1)。

$$\begin{cases} P_s = \frac{V_s V_R}{X_L} \sin \delta \\ Q_s = \frac{V_s}{X_L} (V_s - V_R \cos \delta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V_s \angle \theta_s$ 送端系统; $V_R \angle \theta_R$ 是受端系统; X_L 为线路阻抗; 功角为 $\delta = \theta_s - \theta_R$; 送端有功功率和无功功率分别为 P_s 和 Q_s 。

由式(1)可知, 改变交流系统端电压、线路阻抗或者功率传输角 δ , 便可以实现调节线路的传输功率。而 UPFC 系统兼具上述众多功能, 应用前景广泛。图 1 为 MMC-UPFC 系统结构图, 基于式(1)原理, 通过控制换流器 II, 经串联变压器 T_{Series} 向传输线路插入一个可控电压源 $V_{12} \angle \theta_{12}$ (频率跟随电网频率、 $0 \leq V_{12} \leq V_{12max}$, $0 \leq \theta_{12} \leq 2\pi$), 实现控制线路的潮流传输^[12]。图 1 中两个 MMC 变换器以 AC-AC 拓扑形式组成系统功率变换部分, 可实现电源 $V_{s0} \angle \theta_{s0}$ 同传输线路之间有功功率的双向流动, 且换流器也可同各自交流端进行无功功率交换。

常规 UPFC 系统中的并联侧变压器可接于 V_1 母线处, 但也可联接其他母线实现功率交换, 文中采用 V_{s0} 母线进行联接。MMC 换流器 I 负责直流母线电压稳定, 提供换流器 II 与电网间的有功需求; 也可稳定 $V_{s0} \angle \theta_{s0}$ 母线电压或调节换流器 I 同 $V_{s0} \angle \theta_{s0}$ 的功率因数。 V_{12} 同电网间的无功交换由换流器 II

提供, 有功交换由直流母线提供。UPFC 主要调节功能是由串联侧实现的, 故将围绕 UPFC 串联侧换流器控制策略展开研究。

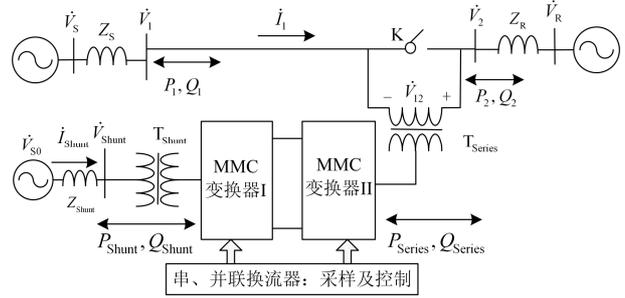


图 1 MMC_UPFC 系统结构图

Fig. 1 Structure of MMC_UPFC system

1.2 MMC_UPFC 的串联侧间接电流控制

MMC 电路采用功率单元级联结构, 高度模块化设计, 调节级联子模块的数量可适应不同的电压等级和容量。相比与传统多电平换流器, 基于 MMC 功率模块设计的 UPFC 系统可以极大限度的提升系统容量与电压等级, 使得 UPFC 更具有实际工程意义。MMC 换流器的拓扑结构如图 2 所示, 每个桥臂有一个电抗器 L_0 和 N 个子模块(SM)相串联组成, 每一时刻上下桥臂共投入 N 个子模块工作。

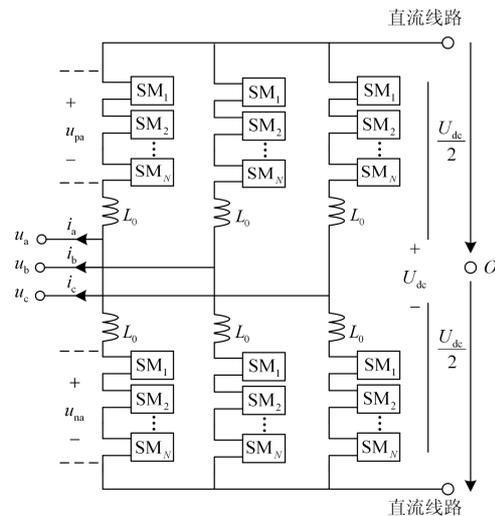


图 2 MMC 换流器结构框图

Fig. 2 Structure of MMC converter

MMC 换流器驱动脉冲的调制方式主要由逐次电平逼近调制(NLM)以及载波移相调制(PSC-PWM)两种调制方式^[12-13]。鉴于 NLM 调制方式动态性能良好, 易于实现等优点, 仿真试验中 MMC 换流器的采用该调制方法。图 2 中 MMC 换流器具有式子(2)所示的数学特性^[14]。

$$\begin{cases} u_a - v_a = L_0 \frac{di_a}{dt} + R_0 i_a \\ v_a = (u_{na} - u_{pa})/2 \\ u_{pa} = U_{dc}/2 - \text{round}(p_a(t)) \times U_{dc} \\ u_{na} = U_{dc}/2 + \text{round}(p_a(t)) \times U_{dc} \\ p_a(t) = m \sin(w_N t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： u_{pa} 、 u_{na} 分别为 A 相上、下桥臂子模块电压之和； u_a 为 MMC 换流器端口 A 相电压； R_0 为桥臂内阻； $p_a(t)$ 为换流器调制波瞬时值； m 为调制系数； w_N 为系统额定角频率； $\text{round}(x)$ 表示取整函数。稳态时可忽略桥臂电抗压降，且 L_0 、 R_0 很小，故可以将 L_0 、 R_0 近似的看做换流器网侧线路阻抗，即上下桥臂忽略桥臂电抗 L_0 及电阻 R_0 。在此基础上可得到以下合理的近似：

$$u_a(t) \approx p_a(t) \times U_{dc} = m \sin(w_N t) \times U_{dc} \quad (3)$$

由式(3)可知，换流器端口电压基波分量可以近似的等效为将调制波进行幅值放大，即三相换流器交流电压的相位、波形对应的跟随调制波形。

间接电流控制策略下，即通过控制 UPFC 串联侧换流器调节 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 幅值与相位，间接实现端口电压 $V_2 \angle \theta_2$ 的移相、调压，线路串补及线路潮流控制等多项功能。基于公式(3)，建立 dq 坐标系下 UPFC 系统相量模型，调节调制信号的 dq 轴分量，便可以近似的控制换流器端口电压的 dq 轴分量。基于该控制思想，提出 UPFC 串联侧 MMC 换流器简化控制策略，实现系统的移相、调压以及潮流控制。

2 UPFC 系统串联侧间接电流控制建模

2.1 恒幅移相控制策略仿真建模

以 UPFC 串联侧端电压 $V_2 \angle \theta_2$ 同 $V_R \angle \theta_R$ 间相角差及 $V_2 \angle \theta_2$ 幅值为控制目标时，图 2 中 MMC_UPFC 系统的相量模型如图 3 所示。 \widehat{HAB} 是以 O 为圆心， V_1 为半径的圆弧。相量 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 与 $V_1 \angle \theta_1$ 相叠加，形成 UPFC 端口电压 $V_2 \angle \theta_2$ 。 V_2 、 V_1 幅值相同，相角相差 $\Delta\delta$ 。控制 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 令 V_2 沿 \widehat{AKB} 变化，即可实现 $V_2 \angle \theta_2$ 恒幅移相，移相范围为 $(-\Delta\delta, \Delta\delta)$ 。由 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 同线路电流 I 的相位关系表明，UPFC 串联侧与输电线路间存在有功功率、无功功率的交换。

UPFC 在恒幅移相工况下，线路端电压 V_1 保持不变，相角差 $\Delta\delta$ 由系统根据潮流需求给出。由图 3 可作如下推导，图示 V_1 保持不变，相角差 $\Delta\delta$ 为正，且 ΔOAK 为等腰三角形，则可求出 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 的幅值和相角为公式(4)。

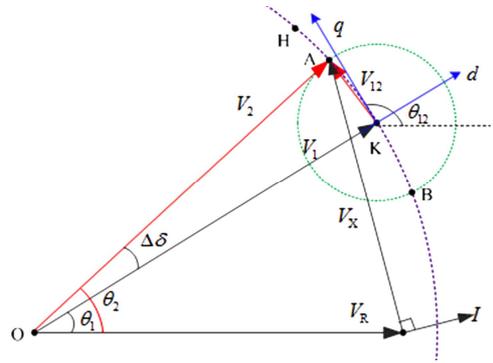


图 3 UPFC 恒幅移相相量模型

Fig. 3 Phasor model of constant amplitude and variable phase

$$\begin{cases} V_{12} = V_1 (\cos \Delta\delta - 1) / \cos \theta_{12} \\ \theta_{12} = 90^\circ + \Delta\delta / 2 \end{cases} \quad (4)$$

图 3 所示，建立 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 的 dq 坐标系，设定 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 的 d 轴跟 $V_1 \angle \theta_1$ 同相， q 轴逆时针超前 d 轴 90° 。且 $\angle OKA = (180^\circ - \Delta\delta) / 2$ ，那么 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 的 dq 轴分量表达式为式(5)。

$$\begin{cases} V_d^* = -V_{12} \sin(\Delta\delta / 2) \\ V_q^* = \pm V_{12} \cos(\Delta\delta / 2) \end{cases} \quad (5)$$

当 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 逆时针超前 $V_1 \angle \theta_1$ 时，式(5)中的 V_q 取正，当顺时针滞后时取负。由式(4)、式(5)可以求解出恒幅移相工况下，串联换流器的参考调制信号的 dq 轴分量 V_d^* 、 V_q^* 。调节参考信号的 dq 轴分量，实现串联侧 MMC 换流器串联变压器电压的 dq 轴分量控制，进一步实现 UPFC 端电压 $V_2 \angle \theta_2$ 幅值与相位的控制，具体的控制结构图如图 4 所示。

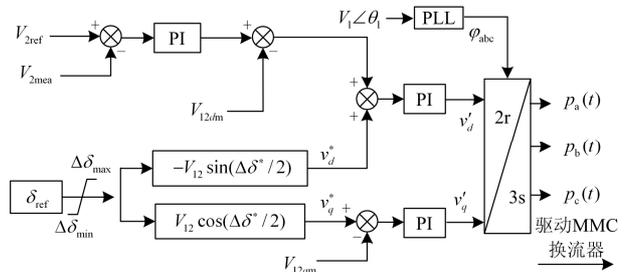


图 4 恒幅移相控制结构图

Fig. 4 Structure of constant amplitude and variable phase

图 4 所示为恒幅移相工况下，串联换流器的控制结构图， d 轴分量控幅值， q 轴分量控相位。移相角参考值 δ_{ref} 经公式(5)计算出 V_d^* 、 V_q^* ，同 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 测量值的 dq 分量 V_{12dm} 、 V_{12qm} 作差，经 PI 环节，产生 MMC 换流器驱动信号。同时在 d 轴控制环中增设

稳压控制环, 即 $V_2 \angle \theta_2$ 三相电压有效值测量量同 UPFC 端电压给定值 1.0(p.u.值)作差经 PI 环节处理, 叠加进 d 轴控制环中。该控制策略下, 系统可以快速跟随移相指令 δ_{ref} , 且能保持 UPFC 端电压幅值 V_2 稳定。

2.2 UPFC 潮流控制策略仿真建模

由公式(1)可知, 实现传输线路的潮流调节有多种控制方式, 如: 调节交流端电压幅值、相位差、线路阻抗等。对公式(1)求微分可知, 调节系统相位来实现有功功率的调节, 及调节线路端电压来实现系统的无功功率的调剂, 具有调节效果显著、性价比高的优点。故将以控制系统相位差、UPFC 串联侧端电压幅值为控制目标, 并进行 UPFC 系统的建模与仿真。采用间接电流控制策略, 控制 UPFC 系统端电压 $V_2 \angle \theta_2$ 的幅值与相位, 实现线路电流即线路潮流传输得以控制。具体的线路潮流控制结构图如图 5 所示。由于 UPFC 系统并联侧换流器功能单一, 负责进行稳定直流母线电压稳定, 调节同交流系统的无功功率交换等, 故不再赘述。

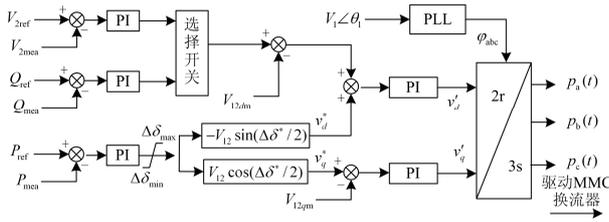


图 5 线路潮流控制结构图

Fig. 5 Structure of line load flow control

图 5 为线路潮流控制仿真建模结构图, 结合恒幅移相控制原理可知, $V_{12} \angle \theta_{12}$ 的 d 轴分量负责调节 UPFC 端口电压同受端交流系统的相位差(即线路有功功率传输), q 轴分量负责调节系统端电压幅值(即线路无功功率传输)。该控制系统的外环控制由 UPFC 端电压控制(或线路无功功率控制)和线路有功潮流控制组成, 系统内环控制由串联变压器 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 的 d 轴、 q 轴分量控制组成。该控制策略有别于电压电流双闭环解耦控制, 无需电流反馈控制, 控制结构得以简化。仿真实验结果表明, 该控制策略下, 系统动态响应良好, 对相关换流器的控制仿真具有一定的参考意义。

3 RTDS 仿真验证

为验证该 MMC_UPFC 系统所采用的串联侧间接电流控制策略的有效性, 及系统的动态性能响应性能, 并尽可能确保仿真参数接近实际工况, 故参照国内某 UPFC 示范工程系统参数, 在 RTDS 小步长 (ns 级) 模块中, 搭建实时仿真模型。并设计恒压移

相控制仿真、线路潮流控制仿真、电网扰动下系统响应仿真等多组算例进行仿真试验验证。该仿真系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 RTDS 关键仿真参数

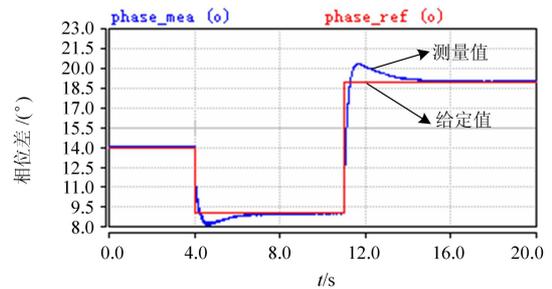
Table 1 Key simulation parameters for RTDS

名称	参数	单位
送端交流母线 V_S	220	kV
送端短路电抗 Z_S	8.08	mH
受端交流母线 V_R	220	kV
受端短路电抗 Z_R	0.1	H
并联侧交流母线 V_{S0}	35	kV
并联侧短路电抗 Z_{Shunt}	2.6	mH
直流母线电压	20	kV
并联变压器变比	35/18	kV
串联变压器变比	26.5/18	kV
串、并联换流器容量	60	MVA
MMC 桥臂电抗	8	mH
MMC 子模块个数	28	个

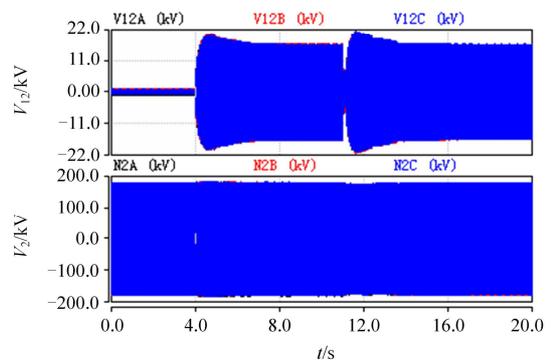
3.1 恒幅移相实验仿真

系统稳态时, 母线 $V_2 \angle \theta_2$ 与 $V_R \angle \theta_R$ 间的相位差稳定在 14° 左右。算例中向 UPFC 发出移相指令如下: $0 \sim 4.0$ s, 无移相指令; $4.0 \sim 11.0$ s, 移相指令为 -5° ; $11.0 \sim 20.0$ s, 移相指令为 $+5^\circ$ 。移相同时应保持 UPFC 端电压 $V_2 \angle \theta_2$ 幅值不变, 观测系统相位差、母线电压、系统潮流等关键变量动态响应。

图 6(a)为相位角测量波形, 由图可以看出 UPFC 通过动态调节串联变压器电压 $V_{12} \angle \theta_{12}$, 使得 $V_2 \angle \theta_2$ 同 $V_R \angle \theta_R$ 间相位跟随相角控制指令由 14° 依次减小



(a) 相位角给定值、测量值



(b) 电压 V_2 、 V_{12} 测量

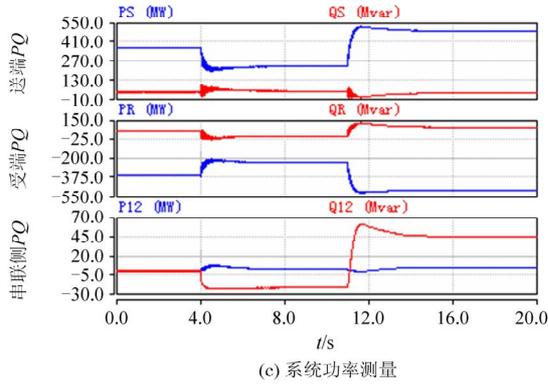


图 6 恒幅移相试验仿真波形

Fig. 6 Waveform of constant amplitude and variable phase

到 9° 再增大到 19° 并保持稳定。由图 6(b)可知在移相过程中, $V_2 \angle \theta_2$ 电压幅值保持稳定, 且电压 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 在移相指令阶跃下发生反向变化, 符合公式 (5) 的公式推导分析。仿真波形显示: 阶跃指令下, 系统的动态响应性能良好。

图 6(c)为系统潮流定性分析, 相位减小时送端有功功率发生跌落。相位增加时送端有功功率变大。由图 3 相量图可知, 控制 $V_{12} \angle \theta_{12}$ 的 q 轴分量实现移相, 由 q 轴分量同线路电流 I 的相位关系可知, 逆时针移相为正时, 串联侧吸收无功, 反之发出无功, 同图 6(c)波形相一致。仿真结果显示, 该简化控制策略下, MMC_UPFC 系统可以有效、快速的跟随相位调节指令。

3.2 线路潮流仿真实验

基于图 5 的潮流控制策略, 制定 3 种 RTDS 仿真算例进行验证。UPFC 系统稳态工况: 有功基准值为 100 MW, 线路电压基准值为 220 kV, 送端相位超前受端 11° 左右, 送端系统输送 300 MW 有功功率, 串联侧换流器同线路传输功率保持在小功率状态, 4 s 时刻触发上阶跃, 12 s 时刻触发下阶跃, 20 s 时刻仿真结束。分别观测: $V_2 \angle \theta_2$ 母线端有功功率给定值及测量值、 $V_2 \angle \theta_2$ 母线端电压给定值及测量值、 $V_2 \angle \theta_2$ 母线端无功功率测量值、 $V_s \angle \theta_s$ 母线电压有效值、 $V_2 \angle \theta_2$ 母线同 $V_R \angle \theta_R$ 母线相位差、串联换流器同线路有功功率交换、串联换流器同线路无功功率交换, 共 7 组关键变量的动态响应。

算例 1: 线路有功功率调节及保持 V_2 幅值恒定。控制目标是实现线路有功功率由 3 p.u. 上阶跃至 4 p.u., 再下阶跃至 3 p.u., 同时维持 UPFC 端电压幅值恒定为 1 p.u.。图 7 为该算例关键变量的动态响应: $V_2 \angle \theta_2$ 母线有功功率能够快速、稳定的跟随功率阶跃指令, 且 $V_2 \angle \theta_2$ 母线端电压控制响应良好,

仅存在很小的冲击波动, 系统动态性能良好。串联侧换流器同线路存在功率交换, 提供无功功率支撑, 调节线路等效阻抗, 改变 $V_2 \angle \theta_2$ 、 $V_R \angle \theta_R$ 间的相位角, 实现有功功率的快速调节。

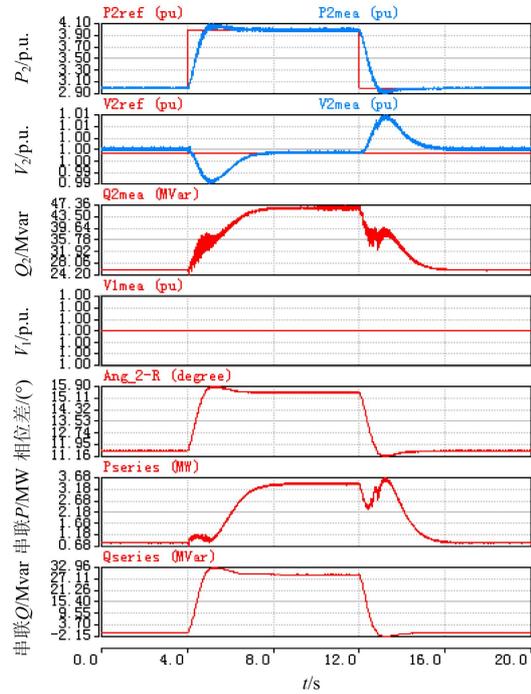


图 7 仿真算例 1 波形观测

Fig. 7 Waveform of simulation No. 1

算例 2: 线路有功功率及无功功率的调节控制。控制目标是实现 $V_2 \angle \theta_2$ 母线的有功功率由 3 p.u. 上阶跃至 4 p.u., 再下阶跃至 3 p.u.。同时实现无功功率由 0 p.u. 上阶跃至 1 p.u., 再下阶跃至 0 p.u.。图 7 为该算例关键变量的动态响应: $V_2 \angle \theta_2$ 母线有功功率及无功功率均能够快速、稳定的跟随功率阶跃指令, 系统动态性能良好。在无功功率跟随控制指令的过程中, $V_2 \angle \theta_2$ 母线端电压幅值不受控制, 且线路串联侧换流器同线路存在有功、无功功率交换。

算例 3: 电网扰动下线路的潮流控制

控制目标是在母线电压 $V_s \angle \theta_s$ 电压幅值由 1 p.u. 跌落 0.1 p.u. 至 0.9 p.u. 工况下, 维持 $V_2 \angle \theta_2$ 母线电压幅值稳定在 1 p.u., 并且保持送端有功功率为 3 p.u.。图 9 所示, 该仿真算例下, 关键变量的动态响应: 仿真结果显示, 相比算例 1 的稳态时, 送端电源跌落所造成的 UPFC 串联侧换流器同线路间的潮流交换, 有很大变化。因为在送端电压跌落的瞬间, $V_2 \angle \theta_2$ 母线电压也存在一个短暂的跌落冲击, 随后又快速稳定在 1 p.u. 处。送端电压的跌落, 触发 UPFC 串联侧调控 d 轴分量, 提升 $V_2 \angle \theta_2$ 母线电压幅值。

电网扰动期间, 线路有功功率控制及直流母线电压控制动态响应良好。

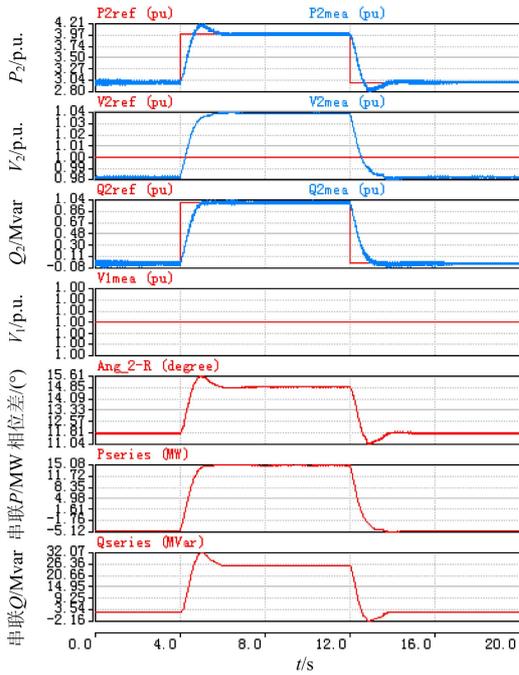


图 8 仿真算例 2 波形观测

Fig. 8 Waveform of simulation No.2

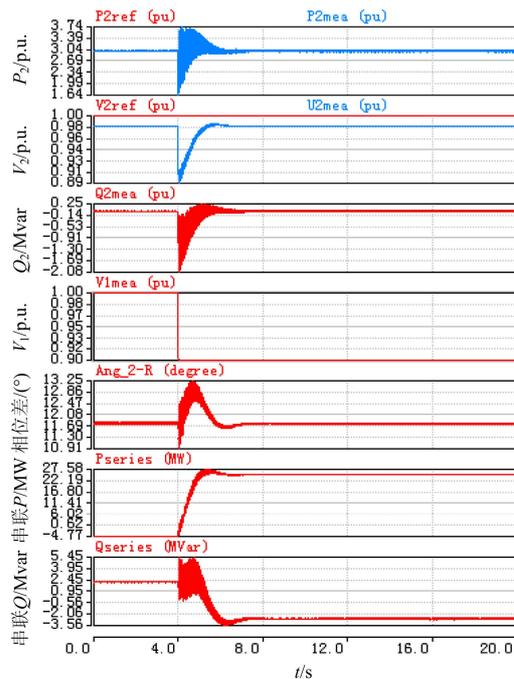


图 9 仿真算例 3 波形观测

Fig. 9 Waveform of simulation No.3

4 结论

1) 指出 UPFC 性能优异、功能强大但工程应用

极少的尴尬现状原因, 随着 MMC 的发展及电网建设的进一步细化, UPFC 的工程应用将逐步得到推广。

2) 分析 UPFC 串联侧工作原理及换流器的特性, 提出了间接电流控制在 MMC_UPFC 串联侧的应用方案, 并基于相量模型推导了该控制策略的仿真建模思路。

3) 为了提升仿真参数的真实性, 结合国内某 UPFC 示范工程参数, 建立 RTDS 小步长仿真试验模型, 并制定恒幅移相、线路阻抗模拟试验算例。

4) 试验结果表明所采用的 MMC_UPFC 串联换流器间接电流控制策略能够使 UPFC 系统快速跟随控制指令, 并呈现良好的调压移相、潮流控制及抗干扰等调节性能。

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] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [3] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣, 等. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.
YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong, et al. Comparative study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.
- [4] 阎博, 汪可友, CROW M L, 等. UPFC 状态反馈精确线性化潮流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 42-48.
YAN Bo, WANG Keyou, CROW M L, et al. UPFC power flow control strategy based on exact linearization via feedback[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 42-48.
- [5] 仇志华, 徐丙垠, 陈青. 基于统一潮流控制器的配电网潮流优化控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 122-126.

- ZHANG Zhihua, XU Bingyin, CHEN Qing. Control strategies for UPFC-based optimal power flow of distribution network with normally closed-loop operation[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 122-126.
- [6] 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.
- [7] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
- [8] 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 1): 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(S1): 67-75.
- [9] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. UPFC 的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 42-48.
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Cross-coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 42-48.
- [10] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001: 166-169.
- [11] 朱鹏程. 用于 UPFC 的串、并联双变流器控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 36-37.
ZHU Pengcheng. Study on the control of the series-parallel double conversion system for UPFC[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 36-37.
- [12] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.
WANG Qian, SONG Qiang, XU Shukai, et al. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission system using RT-LAB[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40.
- [13] 梁寰宇, 苏建徽, 秦喆, 等. 基于 MMC 模块化多电平 STATCOM 的环流抑制均压控制策略研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 60-65.
LIANG Huanyu, SU Jianhui, QIN Zhe, et al. Circulating current suppression and capacitance voltage balancing strategy for modular multilevel converter based STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 60-65.
- [14] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 36-70.

收稿日期: 2016-03-04; 修回日期: 2016-07-08

作者简介:

庄良文(1979-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统仿真实验研究工作;

张彦兵(1989-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事电力系统仿真工作; E-mail: 412048431@qq.com

荆雪记(1979-), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电控制保护系统软件设计工作。

(编辑 张爱琴)