

考虑锁相环动态的柔性直流输电机电暂态模型

王铁柱, 卜广全, 董毅峰, 侯俊贤, 王毅, 穆世霞

(电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Electromechanical Transient Model of VSC-HVDC Considering Dynamics of Phase-Locked Loop

WANG Tiezhu, BU Guangquan, DONG Yifeng, HOU Junxian, WANG Yi, MU Shixia
(State Key Laboratory of Power Grid Security and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192)

ABSTRACT: In process of VSC-HVDC transmission system planning and design, operation and stability analysis and research work, accurate and reliable electromechanical transient model is indispensable. In VSC-HVDC transmission systems, phase locked loop (PLL) module plays the role of measuring and providing phase information to control system. Its phase information measurement is not completely ideal, but has a dynamic process. Existing electromechanical transient (EMT) models of VSC-HVDC all neglect dynamic measurement error of PLL phase information. This is inconsistent with actual dynamic process and reduces simulation accuracy of EMT model in a certain extent. In this paper, influence of PLL dynamic omission on simulation accuracy of EMT model is analyzed. A method considering PLL dynamics in EMT model is proposed. Comparing with EMT model and a large power grid simulation, the proposed model is verified to be accurate and suitable for EMT simulation of large grid.

KEY WORDS: VSC-HVDC; phase-locked loop; dynamic process; electromechanical transient; simulation model

摘要: 在进行柔性直流输电系统的规划设计、调度运行以及稳定性分析与研究等工作时, 离不开准确可靠的柔性直流输电机电暂态模型。柔性直流输电系统中, 锁相环(phase locked loop, PLL)模块起着测量并向控制系统提供相位信息的作用, 其对相位信息的测量不是完全理想的, 而是存在动态过程。现有的柔性直流输电机电暂态模型中均忽略了锁相环对相位信息的动态测量误差, 这与实际动态过程不符, 在一定程度上降低了柔性直流输电系统机电暂态模型的仿真精度。该文分析了忽略锁相环动态对柔性直流输电系统机电暂态

模型仿真精度的影响, 并提出了在机电暂态模型中考虑锁相环动态的方法。通过与电磁暂态模型的仿真对比以及大电网算例仿真, 验证了所提出的考虑锁相环动态后的柔性直流输电机电暂态模型的准确性和适用性。

关键词: 柔性直流输电; 锁相环; 动态过程; 机电暂态; 仿真模型

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2930

0 引言

柔性直流输电技术具有输电方式灵活、无需交流侧提供换相电流、没有无功补偿和换相失败问题、可与弱电网或无源电网相联等特点。此外, 柔性直流输电技术还可以实现有功功率和无功功率的独立、快速控制。基于以上优点, 柔性直流输电技术可广泛应用于交流电网的同步和非同步互联、风电等清洁能源接入、向孤立无源负荷供电、电力市场、构筑大都市直流配电网以及改善电能质量等场合, 具有广阔的应用前景^[1-5]。

在进行柔性直流输电系统的规划设计、调度运行以及稳定性分析与研究等工作时, 离不开准确可靠的柔性直流输电机电暂态模型。柔性直流输电的机电暂态模型包括 MMC 换流器模型、控制系统模型、直流网络模型三部分。换流器模型一般在平均值模型(averaged model, AVM, 假定 MMC 子模块电容电压平均分布, 将桥臂串联子模块等效为电压源)的基础上进一步简化^[6], 仅考虑交流侧调制波的基频分量, 故当采用基频复数相量表示时, MMC 等效为一个简单的受控电压源; 直流网络的电压与电流等物理量并非正弦, 因此, 直流网络模型采用基于瞬时值的电磁暂态建模方法; 控制系统一般按照实际工程中的主要控制环节进行对应的详细建模, 但受限于机电暂态仿真中交流大电网采用基波

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目(± 500 kV 柔性直流电网仿真技术研究(XT71-15-066))。

Project Supported by National Key Research and Development Program (2016YFB0900600); State Grid Science & Technology Project (Research of Simulation Technology of ± 500 kV VSC-HVDC Grid (XT71-15-066)).

分量的根本原理限制, 需要对控制系统中基于瞬时的部分进行等效处理, 比如本文的研究对象——锁相环(phase locked loop, PLL)。

锁相环是锁定相位的环路, 它是一种典型的反馈控制电路, 利用外部输入的参考信号控制环路内部振荡信号的频率和相位, 实现输出信号频率和相位对输入信号频率和相位的自动跟踪^[7-9]。在稳态时锁相环模块可以很好地跟踪输入信号的相位信息, 但锁相环模块对相位的跟踪不是完全理想的, 当输入信号的相位发生变化时, 锁相环需要经过一个动态过程才能使其输出的相位信息与参考信号完全相等, 即锁相环输出的相位信息与参考信号间存在一个动态的测量误差。

文献[10]基于 PSD-BPA 软件建立了柔性直流输电机电暂态模型, 该模型能够处理含有中间连接点的任意结构直流网络, 并具备直流侧故障仿真能力; 文献[11]提出一种基于多速率仿真和简化离散牛顿法的柔性直流与直流电网机电暂态模型, 提高了大扰动时的迭代收敛性; 文献[12]在此基础上对控制系统建模进行了完善, 并详细阐述了不同仿真步长间的配合关系; 文献[13]建立了 VSC 移频相量模型, 推导了 VSC 移频域与其控制系统 dq 域的转换关系, 构建了包含机电暂态的柔性直流输电多尺度暂态模型; 文献[14]建立了一种柔性直流输电简化模型, 只保留主回路准稳态特性和外环控制器, 可用于较大步长的机电暂态仿真。

以上文献都提出了适用于机电暂态仿真的柔性直流输电模型, 但这些模型都忽略了锁相环对相位信息的动态测量误差, 将参考相位信息直接输入给了控制系统。这与实际动态过程不符, 在一定程度上降低了柔性直流输电系统机电暂态模型的仿真精度。

此外, 随着电力系统中新能源发电、柔性直流输电、高压直流输电、FACTS 等电力电子设备的不断增加, 电力系统电力电子化的特点愈发明显, 电力系统的动态特性不再只关乎长时间尺度上的电机转子机械运动, 而是逐渐演化为转子、电容、电感等储能元件在控制算法的作用下展现出的动态特性。电力电子化的电力系统具有可控性强且响应快速的特点, 这决定了物理设备的动态特性与控制算法间存在强耦合, 也决定了系统在不同时间尺度上的动态响应间也存在耦合。这是因为系统短时间尺度上的动态变化可能触发电力电子设备拓扑结构或者控制算法中策略的变化或切换, 而这一变化会持续影响到长时间尺度上的动态特性。因为物理

设备的动态特性与控制算法间存在强耦合, 所以需要控制系统尽可能地进行详细建模, 以充分考虑控制算法对系统的影响; 因为不同时间尺度上的动态响应间也存在耦合, 所以需要在机电暂态仿真程序中对常规直流和柔性直流输电等电力电子设备采用小步长建模仿真, 并与大步长的交流系统进行交替迭代。

为了进一步完善柔性直流输电系统机电暂态模型的仿真精度, 本文对锁相环的原理进行了分析, 明确了忽略锁相环动态后对柔性直流输电系统机电暂态模型仿真精度的影响, 研究了在机电暂态模型中考虑锁相环动态的方法。在两端柔性直流系统中, 通过与电磁暂态模型的仿真对比, 验证了所提出的考虑锁相环动态后的柔性直流输电机电暂态模型的准确性。

1 锁相环的作用与原理

1.1 锁相环在柔直系统中的作用

在柔性直流输电系统的实际控制系统中, 锁相环的作用有 2 个, 一是为控制系统的坐标变换提供参考相位信息, 是经典双闭环解耦控制正确运行的基础; 二是为换流器输出的交流电压提供相位参考点。锁相环的作用示意如图 1 所示, 锁相环模块的输入及输出信号见图中虚线框^[2,8]。

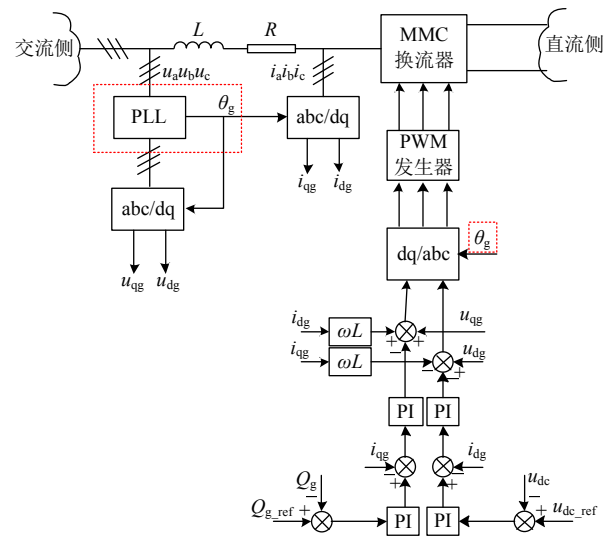


图 1 锁相环作用示意图

Fig. 1 Function of phase-locked loop

1.2 锁相环工作原理

柔性直流输电系统中使用的锁相环典型结构如图 2 所示^[8,15]。其中, u_a 、 u_b 、 u_c 为锁相环模块的输入信号, 此处以柔性直流输电系统控制系统中 PLL 的输入信号——换流变交流侧三相电压为例。 ω_0 为参考基准角速度, 其经过积分环节的输出即为

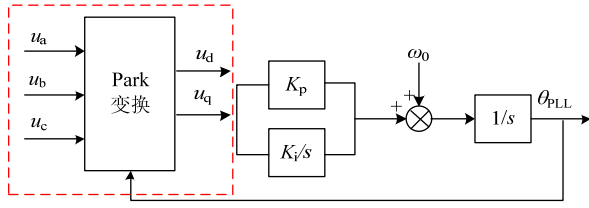


图2 锁相环典型结构

Fig. 2 Typical structure of phase-locked loop

参考基准相位。 θ 为锁相环模块输出的相位角， u_d 、 u_q 为锁相环输入信号 u_a 、 u_b 、 u_c 按照相位角 θ 进行 Park 变换后得到的 dq 轴坐标系下的分量。

Park 变换的作用是将三相静止坐标系中的向量变换到 d-q 同步旋转坐标系中，其示意如图3所示。其中 abc 为三相静止坐标系（取其相位为参考基准相位），dq 为同步旋转坐标系， u_a 、 u_b 、 u_c 为输入信号 U_s 在 abc 三相静止坐标系中的投影， α 为输入信号 U_s 与参考基准相位的相位差（取参考基准相位与 u_a 同相位，锁相环的作用即为得到该相位差）。

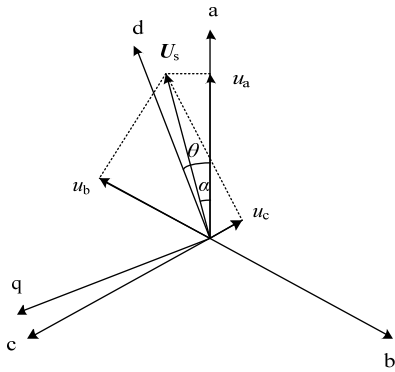


图3 Park 变换示意图

Fig.3 Diagram of Park transformation

设 d-q 旋转坐标系与参考基准相位的相位差为 θ ，则三相静止坐标系转换到 d-q 同步旋转坐标系的变换矩阵 T 为

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

锁相环的工作原理在本质上是一个闭环反馈系统。如图3所示，根据 Park 变换原理，当锁相环输出的相位角 θ 与输入信号的相位信息完全相等时（即 d-q 同步旋转坐标系以输入信号进行定位，d 轴坐标与输入信号同相位， $\theta=\alpha$ ）， u_a 、 u_b 、 u_c 按照 θ 进行 Park 变换后得到的 q 轴分量为零；若锁相环输出的相位角 θ 与输入信号的相位信息不相等，则 u_a 、 u_b 、 u_c 按照 θ 进行 Park 变换后得到的 q 轴分量不为零，此时 u_q 作为偏差量经过 PI 环节对锁相环的输

出进行反馈修正，直到锁相环输出的相位角 θ 与输入信号的相位信息完全相等。

锁相环模块的作用就是测量得到输入信号的相位信息，可以说，输入信号与参考基准相位间相位差的实际值 α 为真值，锁相环输出的相角 θ 可认为是输入信号与参考基准相位间相位差的测量值。

2 现有机电暂态模型的不足

锁相环能够快速跟踪输入信号的相位信息，是柔性直流输电系统能够长期稳定运行的前提关键。由图3可知，当 dq 同步旋转坐标系以系统电压 U_s 进行定位，即令式(1)中的 $\theta=\alpha$ ，则系统电压 U_s 在 q 轴上的投影为零。这是实际柔直工程中控制系统在设计时的假设条件，实际系统在稳态运行时满足该条件。但在动态过程中，锁相环对相位信息的测量并不是理想的，当输入信号的相位发生变化时，锁相环需要经过一个动态过程才能使其输出的相位信息与参考信号完全相等，即锁相环输出的相位信息与参考信号间存在一个动态的测量误差。

实际柔直工程的控制系统以及柔直工程的电磁暂态模型中均考虑了锁相环的动态过程。然而，在现有的柔性直流输电系统机电暂态模型中，出于简化模型的目的，忽略了锁相环对相位信息的动态测量误差，将输入信号的相位信息直接输入给了控制系统，即认为锁相环输出的相位信息测量值始终与真值相等，这与实际工程中的动态过程不符。

根据瞬时功率理论，abc 三相静止坐标系下换流站与交流系统交换的有功功率 P_s 、无功功率 Q_s 分别为

$$P_s = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (2)$$

$$Q_s = \frac{(u_a - u_b)i_c + (u_b - u_c)i_a + (u_c - u_a)i_b}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

在 d-q 同步旋转坐标系下可以表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_d i_q - u_q i_d) \end{cases} \quad (4)$$

在稳态运行时，锁相环输出的相位信息 $\theta=\alpha$ ，使得 U_s 在 q 轴上的投影 u_q 为零，即

$$\begin{cases} u_d = U_s \\ u_q = 0 \end{cases} \quad (5)$$

则式(4)可写为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}u_d i_d \\ Q_s = \frac{3}{2}u_d i_q \end{cases} \quad (6)$$

然而在动态过程中, 当系统电压相位发生变化时, 锁相环输出的相位信息 $\theta \neq \alpha$, 此时 U_s 在 q 轴上的投影 u_q 不为零, 换流站与交流系统交换的有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 需要使用式(4)进行计算, 式(6)不再适用。

若忽略锁相环动态, 认为锁相环输出的相位信息测量值始终与真值相等, 始终使用式(5)(6)计算换流站交流母线电压的 dq 轴分量以及换流站与交流系统交换的功率, 则会在一定程度上降低柔性直流输电系统机电暂态模型的仿真精度。

下面举例说明以上误差。

假设输入信号 u_s 的相角增大, 由 α 变为 $\alpha + \Delta\alpha$, 而此时 PLL 输出的相位信息仍为 $\theta = \alpha$ 。此时的派克变换坐标变换关系为:

$$\mathbf{u}_{dq} = \mathbf{T}_\theta \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \mathbf{T}_\alpha \begin{bmatrix} U_s \cos(\alpha + \Delta\alpha) \\ U_s \cos(\alpha + \Delta\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ U_s \cos(\alpha + \Delta\alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

其中:

$$\mathbf{T}_\theta = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_\alpha = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \alpha & \sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

经推导, 此时坐标变换得到系统电压的 d 、 q 轴分量真值应如式(7)所示:

$$\begin{cases} u_d = U_s \cos \Delta\alpha \\ u_q = U_s \sin \Delta\alpha \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 此时若仍使用式(5)进行系统电压 dq 轴分量的计算, 则会引入误差。相应的, 若忽略锁相环的动态过程, 按照式(6)计算有功功率和无功功率, 同样会引入误差。

在此情况下, 因忽略锁相环动态而在 u_d 、 u_q 、 P_s 、 Q_s 的计算结果中引入的误差 w 如式(8)所示:

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_{ud} \\ w_{uq} \\ w_p \\ w_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s(\cos \Delta\alpha - 1) \\ U_s \sin \Delta\alpha \\ \frac{3}{2} U_s i_q \sin \Delta\alpha \\ -\frac{3}{2} U_s i_d \sin \Delta\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(8)可知, 换流站交流母线电压的 dq 轴

分量以及换流站与交流系统交换的功率的计算误差, 与忽略锁相环动态特性后产生的角度测量误差成正比相关。当系统运行状态发生突变, 使得柔性直流输电系统的交流侧电压相角发生变化时, 现有的柔性直流输电系统机电暂态模型的计算结果会存在偏差。

3 考虑锁相环动态的机电暂态模型

由前面的分析可知, 通过考虑锁相环的动态过程, 可以提高柔性直流输电系统机电暂态模型的仿真精度。

对于图2所示的锁相环典型原理, 机电暂态中无法获取输入信号的三相瞬时值, 因此需要对其进行修改, 以适应机电暂态仿真原理。

机电暂态模型中虽然无法获取三相电压瞬时值, 但可以计算得到换流站交流母线处的基波交流电压有效值 u_s 与其相位信息 θ_s , 此相位信息即为 u_s 的真实相位信息, 亦即锁相环需要跟踪的真值。根据式(7)可得, 当锁相环输出的相位信息 θ_{PLL} 与其跟踪的真值不等时, 会使得派克变换所得的 q 轴电压分量 u_q 不为零, 且其可由 u_s 、 θ_s 、 θ_{PLL} 计算得到。

在图2所示原理图中, 从一个稳定运行点出发, 此时有 $\theta_{PLL} = \theta_s$; 当系统状态突变使得系统电压相位由 θ_s 变化为 θ'_s , 变化量为 $\Delta\theta = \theta'_s - \theta_s$, 则此时 u_q 满足式(7)。基于以上关系, 将图2中虚线内部分进行等效, 则可得修改后的适用于机电暂态仿真的锁相环暂态模型结构, 如图4所示。该机电暂态模型结构与电磁暂态中的锁相环结构等效。

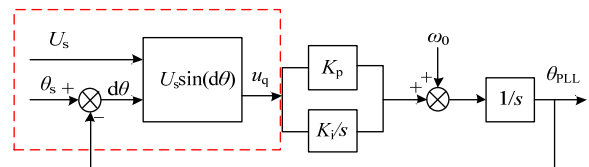


图4 锁相环机电暂态模型结构

Fig. 4 Structure of phase-locked loop for electromechanical transient model

同时, 在柔性直流输电系统机电暂态仿真系统中, 按照式(9)计算交流电压的 d 、 q 轴分量 u_d 、 u_q , 并按照式(4)计算有功功率、无功功率。

$$\begin{cases} u_d = U_s \cos(\theta_s - \theta_{PLL}) \\ u_q = U_s \sin(\theta_s - \theta_{PLL}) \end{cases} \quad (9)$$

需要指出的是, 当柔性直流输电系统中某个换流站接入的是无同步电源支撑的孤岛系统时, 该换流站的实际控制系统中无锁相环模块, 机电暂态模型中会根据实际系统条件进行相应切换。

4 仿真验证

4.1 方法正确性验证

由前面的分析可知,锁相环产生动态过程的情况主要为交流侧故障、交直流交换功率改变这两种情形,其本质为柔直交流母线出口处的交流电压幅值和相角发生变化。为验证本文给出的机电暂态模型的正确性,分别在电磁暂态和机电暂态模型中进行交流侧故障、柔直系统功率反转两种情况的仿真,并对仿真结果进行对比分析。

文献[16-17]给出了 MMC 换流器的戴维南等效建模方法,有效地提升了 MMC 换流器电磁暂态模型的仿真效率。文献[10-14]给出了柔性直流输电系统的机电暂态建模方法。本文在以上工作的基础上,分别在 PSCAD 与 PSD-BPA 中建立了如图 5 所示的两端 MMC 柔性直流输电系统的电磁暂态与机电暂态测试系统。

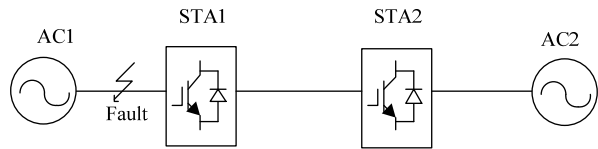


图 5 两端 MMC 柔性直流输电系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 2-terminal MMC-MTDC

其中,在 PSD-BPA 现有的柔性直流输电系统机电暂态模型的基础上,添加上文所述的考虑动态特性的锁相环机电暂态模型。

直流系统电压为 ± 500 kV, STA1、STA2 的交流侧电压为 230 kV,系统等值阻抗均设为 2.85Ω ,换流站的额定功率为 1500 MW。主要设备参数如表 1 所示。STA1 采用定有功功率和定无功功率控制,STA2 为平衡站并采用定直流电压和定无功功率控制^[18,19]。

表 1 主设备参数	
Tab. 1 Parameters of main equipment	
项目	参数值
单桥臂子模块数	242
子模块电容值	8000 μF
桥臂电抗器	100 mH
平波电抗器	300 mH
换流变压器漏抗	0.18 pu

设置换流站 STA1 的交流母线处发生瞬时三相经电阻接地短路故障,故障发生时刻 2.0 s,故障持续时间 0.1 s。在机电暂态模型中分别设置不考虑锁相环动态和考虑锁相环动态两种情况,其仿真结果与电磁暂态仿真结果的对比如图 6 所示。

从中可以看出,当不考虑锁相环动态时机电暂态结果中扰动期间 STA1 交流母线电压的 q 轴分量

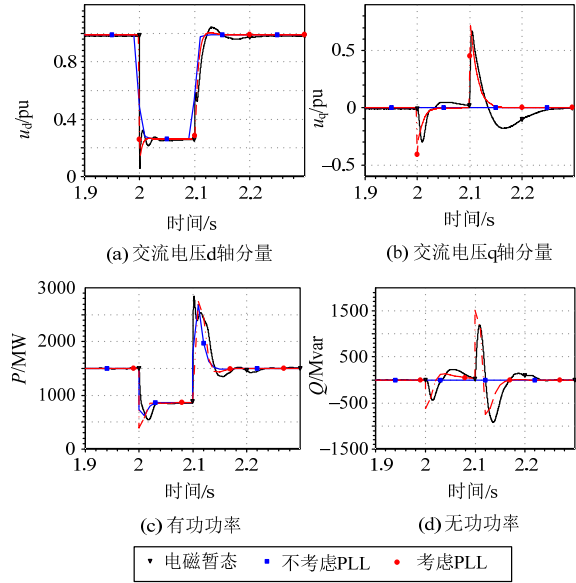


图 6 交流系统故障时仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results for AC side fault

始终为零,交流侧无功功率始终为零,这与电磁暂态结果不符;考虑锁相环动态后,机电暂态仿真精度得到了极大改善,交流母线电压的 d/q 轴分量、交流侧有功/无功功率的仿真结果与电磁暂态结果更为接近。

设置换流站 STA1 采用定有功功率和定交流电压控制,其输送的有功功率在 2.0 s 时由 1500 MW 反转为-1500 MW。在机电暂态模型中分别设置不考虑锁相环动态和考虑锁相环动态两种情况,其仿真结果与电磁暂态仿真的对比如图 7 所示。从对比结果中可以看出,本文提出的考虑锁相环动态的柔

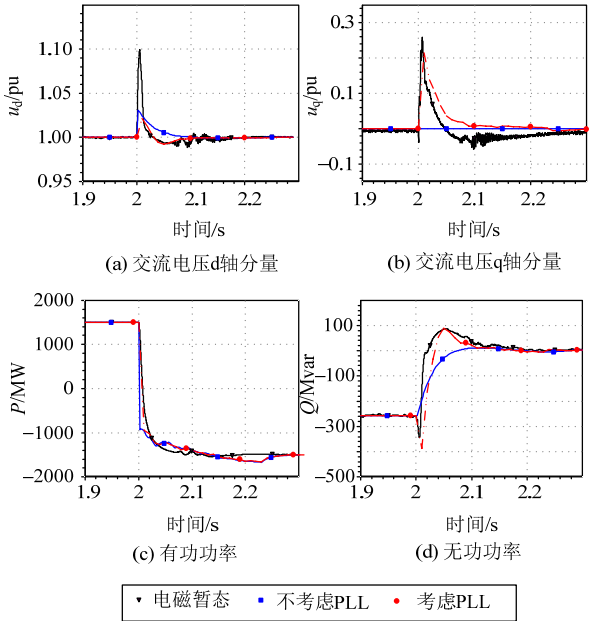


图 7 功率反转时仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of simulation results for power inversion

性直流输电系统机电暂态模型仿真结果更符合实际，仿真精度更高。

4.2 大电网仿真适用性验证

为验证本文所提方法在大电网仿真中的适用性，本文基于包含渝鄂柔直工程的大电网仿真算例进行仿真分析。渝鄂柔直工程是实现西南和华中电网异步联网的背靠背柔直工程，包含北通道、南通道 2 个通道，每个通道包含 2 个单元，每个单元额定功率 1250 MW，额定直流电压 ± 420 kV。

大电网算例中渝鄂柔直的初始运行方式是北通道 2 个单元均由鄂侧向渝侧输送功率 750 MW。在 0.2 s 时，渝侧换流站与西南交流电网的主要功率输送通道发生短路故障，0.3 s 时该交流通道被切除，渝侧换流站与附近的发电机组形成一个小孤岛，此时渝侧换流站需要将功率反送到鄂侧，渝侧换流站的有功功率定值由-750 MW 变为 500 MW。该暂态过程的仿真结果如图 8 所示，其中黑色曲线为考虑 PLL 动态时的仿真结果，蓝色曲线为不考虑 PLL 动态时的仿真结果，红色虚线为以上 2 种仿真结果的差值。从中可以看出，是否考虑锁相环动态所引起的仿真结果差别主要存在于故障发生时刻

和故障恢复阶段，即系统电压相角发生变化期间，与上文分析相符。具体到本算例，该暂态过程仿真中若不考虑 PLL 动态，交流电压最大误差为 0.091 pu，无功功率最大误差为 156 Mvar，误差持续时间为 2~3 周波。

由以上对比分析可以得出，考虑锁相环动态的柔性直流输电系统机电暂态模型适用于大电网仿真，可以提高包含柔性直流系统的大电网仿真精度。

5 结论

1) 柔性直流输电系统中，锁相环模块起着测量并向控制系统提供相位信息的作用，其对相位信息的测量不是完全理想的，而是存在动态过程。如果忽略锁相环动态，则会对柔性直流输电系统机电暂态模型仿真结果引入误差。

2) 本文提出了在机电暂态模型中考虑锁相环动态的方法，通过与电磁暂态模型的仿真对比，验证了所提出的考虑锁相环动态后的柔性直流输电机电暂态模型的正确性；基于包含柔直系统的大电网仿真算例，验证了本位所提方法在大电网仿真中的适用性。

参考文献

- [1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 66-71.
- [2] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 7-12.
- [3] 宋艺航, 谭忠富, 李欢欢, 等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 610-615.
Song Yihang, Tan Zhongfu, Li Huanhuan, et al. An optimization model combining generation side and energy storage system with demand side to promote accommodation of wind power[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 610-615(in Chinese).
- [4] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
Wang Xifan, Wei Xiaohui, Ning Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466(in Chinese).
- [5] 范心明, 管霖, 夏成军, 等. 多电平柔性直流输电在风电接入中的应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 497-504.
Fan Xinming, Guan Lin, Xia Chengjun, et al. Multilevel VSC-HVDC applied in wind power integration[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 497-504(in Chinese).
- [6] Jaime Peralta, Hani Saad, Sébastien Dennerrière. Detailed and averaged models for a 401-Level MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.
- [7] 陈国栋, 朱淼, 蔡旭, 等. 一种软件锁相环和电压跌落检测新算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4385-4394.
Chen Guodong, Zhu Miao, Cai Xu, et al. A new algorithm for software phase locked-loop and voltage sag detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4385-4394(in Chinese).
- [8] 熊凌飞, 韩民晓, 姚蜀军. 锁相环对多端柔性直流稳定性作用分析及参数选择研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 203-212.

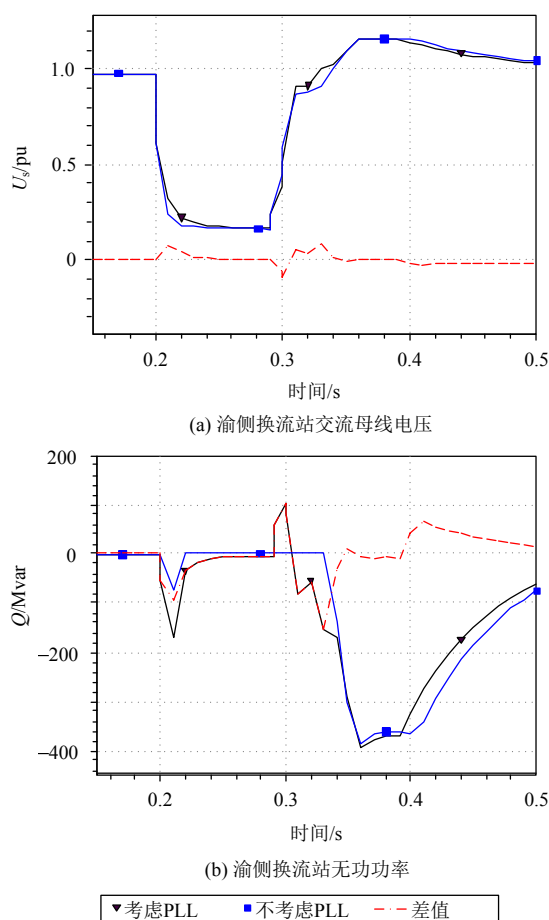


图 8 大电网仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of large grid simulation results

- Xiong Lingfei, Han Minxiao, Yao Shujun. Influence of PLL on the stability analysis of VSC-MTDC and parameter selection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 203-212(in Chinese).
- [9] 陈东明, 陈明亮, 谢桢, 等. 基于改进滤波及正负序分离法的锁相环[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 931-937.
Chen Dongming, Chen Mingliang, Xie Zhen, et al. A PLL based on improved filter and sequence detection method[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 931-937(in Chinese).
- [10] 万磊, 汤涌, 吴文传, 等. 基于模块化多电平换流器的高压直流电网机电暂态仿真模型[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2085-2091.
Wan Lei, Tang Yong, Wu Wenchuan, et al. Electromechanical transient model of HVDC grids based on modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2085-2091(in Chinese).
- [11] 丁平, 安宁, 李亚楼, 等. 基于多速率仿真和简化离散牛顿法的电压源型换流器和直流电网机电暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6809-6819.
Ding Ping, An Ning, Li Yalou, et al. An electromechanical transient model of VSC and DC grid based on multi-rate simulation method and simplified discrete newton method[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6809-6819(in Chinese).
- [12] 丁平, 安宁, 赵敏, 等. 一种实用的电压源型换流器及直流电网机电暂态建模方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 69-76.
Ding Ping, An Ning, Zhao Min, et al. A practical modeling method of VSC-HVDC and DC-Grid electromechanical transient [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 69-76(in Chinese).
- [13] 叶华, 安婷, 裴玮, 等. 含 VSC-HVDC 交直流系统多尺度暂态建模与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1897-1908.
Ye Hua, An Ting, Pei Wei, et al. Multi-scale modeling and simulation of transients for VSC-HVDC and AC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1897-1908(in Chinese).
- [14] Sheng Liu, Zheng Xu, Wen Hua, 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.
- [15] 刘巨, 姚伟, 文劲宇. 考虑 PLL 和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3162-3173.
Liu Ju, Yao Wei, Wen Jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3162-3173(in Chinese).
- [16] 许建中, 赵成勇, Gole Aniruddha M. 模块化多电平换流器戴维南等效整体建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1919-1929.
Xu Jianzhong, Zhao Chengyong, Gole Aniruddha M. Research on the thévenin's equivalent based integral modelling method of the modular multilevel converter(MMC)[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1919-1929(in Chinese).
- [17] 喻锋, 王西田, 林卫星, 等. 模块化多电平换流器快速电磁暂态仿真模型[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 257-263.
Yu Feng, Wang Xitian, Lin Weixing, et al. Fast electromagnetic transient simulation models of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 257-263(in Chinese).
- [18] 陈海荣, 徐政. 基于同步坐标变换的 VSC-HVDC 暂态模型及其控制器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 121-126.
Chen Hairong, Xu Zheng. Transient model and controller design for VSC-HVDC based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 121-126(in Chinese).
- [19] 王铁柱, 卜广全, 王姗姗, 等. 一种提高 MMC 交流电压鲁棒性的改进调制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 797-803.
Wang Tiezhu, Bu Guangquan, Wang Shanshan, et al. An improved modulation strategy for improving the robustness of MMC AC voltage[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 797-803(in Chinese).



王铁柱

收稿日期: 2017-12-12。

作者简介:

王铁柱(1989), 男, 硕士, 工程师, 通信作者, 研究方向为特高压直流输电、柔性直流输电、电力系统仿真和分析技术, E-mail: wangtiezhu@epri.sgcc.com.cn;

卜广全(1962), 男, 教授级高工, 研究方向为电力系统仿真分析和运行控制技术;

董毅峰(1985), 男, 高级工程师, 研究方向为特高压直流输电、柔性直流输电、电力系统仿真和分析技术;

侯俊贤(1978), 男, 教授级高工, 研究方向为电力系统仿真和分析技术。

(实习编辑 宋钰龙)