

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.016

# 基于虚拟线路补偿的主动配电网混合仿真接口实现方法

鄂涛, 尹忠东, 王群飞

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:**数字物理混合仿真是未来主动配电网仿真分析的有效手段,而接口算法是确保其系统稳定性和精确性的关键。针对现有接口算法无法适用于主动配电网混合仿真的问题,文中提出一种基于虚拟线路补偿的改进功率接口算法。首先,在分析理想变压器模型(ITM)法结构与稳定条件的基础上,提出在数字侧与物理侧间增设一条虚拟线路。然后,基于线路上虚拟电流对系统进行稳定性补偿,并给出了线路阻抗的取值范围;同时,针对接口固有延迟及稳定性补偿引入的误差,提出根据虚拟线路上流过的虚拟功率对接口两侧的相位差进行补偿,以保证精确性。最后,通过仿真和实验将文中所提方法与ITM法、阻尼阻抗法及虚拟阻抗法相比较,验证了文中方法在提升主动配电网混合仿真系统稳定性及精度上的有效性和优越性。

**关键词:**数字物理混合仿真;主动配电网;虚拟线路补偿;功率接口算法;功率硬件在环;理想变压器模型(ITM)

中图分类号:TM743

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)03-0133-10

## 0 引言

含有风电、光伏等多种分布式电源的主动配电网已经成为未来智能配电网发展重要的方向<sup>[1-3]</sup>。新能源的接入使配电网各环节特性及其相互作用机理都发生了深刻变化<sup>[4-7]</sup>,因此,有必要对新能源设备运行特性及其对电网的影响进行研究。传统的数字仿真难以精确模拟分布式电源的动态特性<sup>[8]</sup>,而物理模拟仿真造价高、灵活性差,难以对主动配电网的多种工况进行模拟<sup>[9]</sup>。数字物理混合仿真将两者优势相结合,将大规模的电力网络运行于实时仿真器中,而需要准确模拟的分布式电源物理设备则通过功率接口接入<sup>[10-13]</sup>,这种方式又称为功率硬件在环(power-hardware-in-the-loop, PHIL)仿真,是未来主动配电网仿真分析的重要手段<sup>[14-15]</sup>。

连接数字侧与物理侧的功率接口是PHIL系统中的关键环节。受延迟、噪声等原因影响,功率接口中引入的误差会影响仿真系统的精度与稳定性<sup>[16-17]</sup>。针对不同的仿真对象,应选用合适的接口算法,目前最为常用的有理想变压器模型(ideal transformer model, ITM)法和阻尼阻抗法(damping impedance method, DIM)2种<sup>[18]</sup>。在应用于主动配电网混合仿真时,这2种方法主要存在如下问题:(1)ITM法实现简单,但稳定性较差<sup>[19]</sup>,一旦发生失稳,会损坏物理设备,且接口延时会对ITM的精确性产生影响;(2)DIM的关键在于阻尼阻抗与物理侧阻抗的实时匹配<sup>[20]</sup>,但主动配电网系统物理侧

的阻抗难以实时测量与跟踪。

针对以上问题,文献[21]在ITM法的基础上,选择在物理侧串入电抗器,以解决稳定性问题,但该方法在增加成本的同时会降低仿真精度。文献[22-23]加入了虚拟电阻和虚拟阻抗对ITM的反馈电流进行补偿。该方法需要提前对阻抗取值进行设计,以保证接口性能,但主动配电网运行工况复杂难以预测,阻抗取值计算十分困难,故无法直接应用于主动配电网的混合仿真中。文献[24-25]基于DIM,通过采集物理侧电压和电流实时计算等效阻抗,但该方法无法应用于主动配电网这类有源系统。文献[26]将简化后的DIM与ITM法相结合得到了一种改进接口算法,但该方法需要在仿真器中建立2套相同的仿真模型,而主动配电网仿真系统规模较大,现有仿真器的运算速度难以满足该需求。

由上述分析可知,现有的功率接口算法均无法迎合主动配电网混合仿真的需求。因此,文中提出一种基于虚拟线路补偿的改进ITM法,在ITM法的基础上,在数字侧与物理侧间增设了一条虚拟线路。在线路上的虚拟电流对系统进行稳定性补偿的同时,根据虚拟功率对接口两侧的相位差进行补偿。该方法消除了接口延迟及稳定性补偿所引入的误差,简化了接口参数选取过程,既保证了系统稳定性又提升了仿真精度。与现有方法相比,该方法能适应物理侧有源、非线性等多种情况,且不必额外增加物理设备,实现简单。仿真和实验结果表明,所提方法在主动配电网混合仿真的不同工况下效果均良好。

收稿日期:2021-12-27;修回日期:2022-03-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903005)

## 1 PHIL 系统结构及稳定性分析

### 1.1 配电网混合仿真系统结构

主动配电网 PHIL 仿真系统主要由数字仿真系统 (digital simulation system, DSS)、物理仿真系统 (physical simulation system, PSS) 及功率接口三部分组成, PHIL 仿真系统具体结构如图 1 所示。

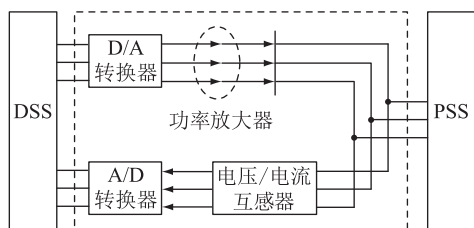


图 1 PHIL 仿真系统结构

Fig.1 Structure of PHIL simulation system

DSS 是运行于实时仿真器上的主动配电网数字模型, PSS 是模拟线路、可编程负载、风电光伏模拟器、无功补偿装置等的物理模拟装置, 两者通过功率接口相连进行数字物理混合仿真。DSS 中电压、电流数字信号经 D/A 转换器转换为模拟信号后, 经四象限功放放大为功率流, 并作为激励送入 PSS 侧。电压/电流互感器采集到实际物理设备的电压和电流模拟信号后, 经 A/D 转换器反馈回 DSS 侧, 用于求解下一仿真步长的系统状态。

功率接口部分中硬件装置存在不可避免的传输延时, 数模转换装置和互感器的延迟一般很小, 可以忽略, 但功放的延时较大, 会对系统的稳定性及仿真精度产生影响。文中以 ITM 法为例对 PHIL 仿真系统的稳定性进行分析。

### 1.2 ITM 稳定性分析

ITM 法是最基本、实现最为简单的一种接口算法, 分为电压型和电流型 2 种。电压型 ITM 接口结构如图 2 所示, 基于替代定理将物理侧在数字侧等效为受控电流源, 通过互感器采集功放输出的电流  $i_2$  进行控制; 数字侧电压  $U_1$  作为功放的控制信号, 功放等效为受控电压源, 在物理侧施加电压  $U_2$ 。  $i_1$  为受控电流源所在支路的电流;  $T_d$  为功放的传输延时;  $Z_1, Z_2$  分别为数字侧和物理侧的等效阻抗;  $U_s, U_H$  分别为数字侧和物理侧的等效电源。

由于延时的存在, 在同一时刻  $U_1$  和  $U_2$  间存在误差量  $\varepsilon$ , 电压误差会在物理侧形成电流误差  $\Delta i$ 。

$$\Delta i = \varepsilon / Z_2 \quad (1)$$

误差  $\Delta i$  传回数字侧, 进一步导致数字侧出现电压误差  $\Delta U$ 。

$$\Delta U = - (Z_1 / Z_2) \varepsilon \quad (2)$$

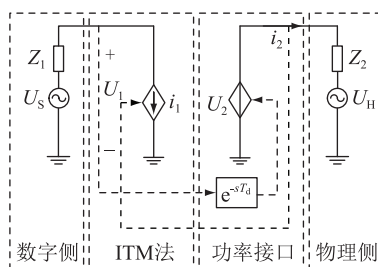


图 2 电压型 ITM 接口结构

Fig.2 Interface structure of voltage type ITM

当  $|Z_1 / Z_2| > 1$  时, 误差量将在循环过程中不断放大, 最终导致系统失去稳定。ITM 的开环传递函数为:

$$G_{ITM} = (Z_1 / Z_2) e^{-sT_d} \quad (3)$$

根据奈奎斯特稳定性判据也可以获得 ITM 稳定的充要条件为  $|Z_1 / Z_2| < 1$ , 即数字侧阻抗小于物理侧。但对主动配电网混合仿真而言, 数字侧一般为含有分布式电源的复杂配电网数字仿真模型; 物理侧为分布式电源、多条模拟线路及多个负载。物理侧接入位置的选择、分布式电源及负荷的投切、故障的发生, 均会使数字侧和物理侧等效阻抗比值发生变化。当两者之间关系不再满足稳定条件时, 系统会失稳, 因此需要在 ITM 法的基础上针对稳定性及延迟问题进行改进。

## 2 基于虚拟线路补偿的改进 ITM 法

假设在数字侧和物理侧之间存在一条如图 3 所示的虚拟线路, 线路的首末端电压分别等于  $U_1$  和  $U_2$ ; 线路阻抗为  $Z^*$ ; 虚拟线路的压降即为误差量  $\varepsilon$ 。由于两端电压差的存在, 线路上会产生虚拟电流  $I^*$  和虚拟功率  $S^*$ 。  $I_1$  为受控电流源输出电流;  $I_1'$  为流过数字侧阻抗的电流;  $I_2$  为受控电压源输出电流;  $I_2'$  为流过物理侧阻抗的电流;  $T$  为系统的总传输延迟。

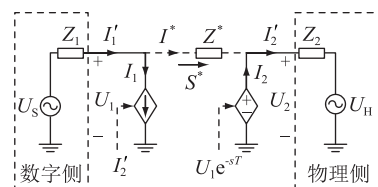


图 3 基于虚拟线路补偿的接口结构

Fig.3 Interface structure based on virtual line compensation

文中所提的基于虚拟线路补偿的改进 ITM 法包含接口稳定性改进和精确性补偿两部分。精确性改进策略能消除系统固有延迟和稳定性补偿引入系统的误差, 保证了接口的精确性。而当系统状态发生突变后, 精确性补偿策略在短时间内无法实

现对相位的完全补偿,系统可能发生失稳。此时,需要通过稳定性改进算法使系统在仿真过程中一直保持稳定。改进算法的两部分相辅相成,共同保证了接口的精度与稳定性。

## 2.1 稳定性改进

由 ITM 稳定的充要条件可知减小数字侧等效阻抗或增大物理侧等效阻抗均可达到增强稳定性的目的。在频域内对系统稳定性进行分析,虚拟线路的引入会产生虚拟电流  $I^*$ ,此时  $I_1, I'_1, I_2, I'_2$  具体数量关系变为:

$$\begin{cases} I'_1 = I_1 + I^* \\ I'_2 = I_2 + I^* \end{cases} \quad (4)$$

受控电流源的控制量由  $I_2$  变为:

$$I_1 = I'_2 = I_2 + I^* \quad (5)$$

其中:

$$I^* = (U_1 - U_2)/Z^* \quad (6)$$

由图 3 可得,含虚拟线路功率接口的交互方程为:

$$\begin{cases} U_2 = U_1 e^{-sT} \\ I_1 = I'_2 \end{cases} \quad (7)$$

当  $U_H = 0$  时,可得:

$$\begin{cases} U_1 = U_s - I'_1 Z_1 \\ U_2 = I'_2 Z_2 \end{cases} \quad (8)$$

联立式(4)一式(8),可得:

$$\frac{U_2}{U_s} = \frac{Z^*}{Z_1 + Z^*} e^{-sT} / \left[ 1 + \frac{Z_1(Z^* - Z_2)}{Z_2(Z^* + Z_1)} e^{-sT} \right] \quad (9)$$

引入虚拟线路后,接口开环传递函数为:

$$G_Z = \frac{Z_1(Z^* - Z_2)}{Z_2(Z^* + Z_1)} e^{-sT} \quad (10)$$

由奈奎斯特稳定性判据可知,引入虚拟线路后,接口稳定条件为:

$$\left| \frac{Z_1(Z^* - Z_2)}{Z_2(Z^* + Z_1)} \right| < 1 \quad (11)$$

加入虚拟线路后,系统的稳定性不光取决于  $Z_1$  和  $Z_2$  的比值,  $Z^*$  的取值变化同样会影响系统稳定性。令  $s = j\omega$ ,则数字侧、物理侧及虚拟线路阻抗值分别为:

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + sL_1 = R_1 + jX_1 \\ Z_2 = R_2 + sL_2 = R_2 + jX_2 \\ Z^* = R^* + sL^* = R^* + jX^* \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $R_1, L_1$  分别为数字侧的等效电阻与电感;  $R_2, L_2$  分别为物理侧的等效电阻与电感;  $R^*, L^*$  分别为虚拟线路阻抗的电阻与电感;且有  $X_1 = \omega L_1, X_2 = \omega L_2,$

$X^* = \omega L^*$ 。将式(12)代入式(11)中,化简后稳定条件变为:

$$\begin{aligned} & (|Z_1|^2 - |Z_2|^2)(R^{*2} + X^{*2}) - 2R^*(R_2|Z_1|^2 + \\ & R_1|Z_2|^2) - 2X^*(X_2|Z_1|^2 + X_1|Z_2|^2) < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

令:

$$\begin{cases} a = (R_2|Z_1|^2 + R_1|Z_2|^2)/(|Z_1|^2 - |Z_2|^2) \\ b = (X_2|Z_1|^2 + X_1|Z_2|^2)/(|Z_1|^2 - |Z_2|^2) \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)中,根据数字侧阻抗  $Z_1$  和物理侧阻抗  $Z_2$  的大小关系不同,稳定条件可转化为以下 3 种情况。

(1) 当  $|Z_1| > |Z_2|$  时,稳定条件为:

$$(R^* - a)^2 + (X^* - b)^2 < a^2 + b^2 \quad (15)$$

(2) 当  $|Z_1| < |Z_2|$  时,稳定条件为:

$$(R^* + a)^2 + (X^* + b)^2 > a^2 + b^2 \quad (16)$$

(3) 当  $|Z_1| = |Z_2|$  时,若满足  $R^* > 0, X^* > 0$ ,式(13)恒成立。

虚拟线路阻抗取值范围示意图 4。当  $|Z_1| > |Z_2|$  时,虚拟阻抗取值在圆  $O_1$  内稳定;当  $|Z_1| < |Z_2|$  时,虚拟阻抗取值在圆  $O_2$  外的区域稳定;当  $|Z_1| = |Z_2|$  时,虚拟阻抗取值在第一象限内稳定。所以只要虚拟线路阻抗值在 3 种情况取值范围的交集内,即图中的深色区域内时,混合仿真系统就可以一直保持稳定。

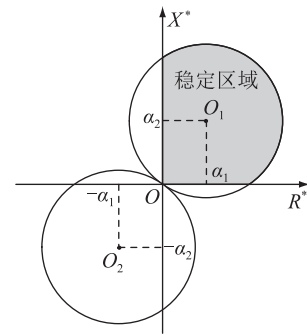


图 4 虚拟线路阻抗取值范围

Fig.4 Value range of virtual line impedance

## 2.2 精确性补偿

虚拟线路的引入在改变系统稳定性的同时,也会影响系统的仿真精度。在理想状态下,数字侧受控电流源输出电流  $I_1$  和物理侧实际电流  $I_2$  应相等,但观察式(5)、式(6)可以发现,虚拟阻抗  $Z^*$  的引入会使两者之间产生偏差,虚拟阻抗的模越小,偏差越大。为尽量减小误差,应将虚拟阻抗设置为稳定范围内的最大值。但在进行主动配电网混合仿真时,往往需要在多种工况间进行切换。为保证系统

在切换前后及过程中一直保持稳定,接口需要拥有较大的稳定裕度,因此虚拟线路阻抗的取值  $Z^*$  应满足:

$$|Z^*| \leq \min\{|Z_1^*|, |Z_2^*|, \dots, |Z_n^*|\} \quad (17)$$

式中:  $Z_n^*$  为第  $n$  种工况下虚拟阻抗在稳定范围内的最大取值。假设  $|Z_1^*|$  最小,对于除工况 1 以外的其他工况来说,虚拟阻抗会带来较大的误差。由式(6)可知,若虚拟线路首末端电压  $U_1$  和  $U_2$  近似相等,则虚拟电流  $I^* \approx 0$ ,此时  $Z^*$  的取值只会对系统的精确性造成极小的影响。因此,可以通过加入相位补偿使  $U_1$  和  $U_2$  同步,达到消除误差的目的。

功放的延时会导致同一时刻的  $U_1$  和  $U_2$  不再相同,在频域表现为交流信号的相位滞后,因此对延迟产生的电压相位差进行补偿可起到减小误差量  $\varepsilon$ ,增强系统稳定性和精确性的效果。主动配电网混合仿真的实际过程中,由于分布式电源、噪声干扰等原因,电压信号中会含有一定量的谐波,加大了获得准确相位差的难度。通过傅里叶分解,对各次谐波相位分别进行计算是获取精确相位差最为常用的方法。但此方法计算复杂,耗时长,无法满足实时补偿的要求<sup>[27-28]</sup>,因此文中提出了基于虚拟线路的相位补偿策略。当延时存在时,由于线路两端电压相位差,线路上会产生虚拟功率  $S^*$ 。

$$|\dot{S}^*| = \left| \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{Z^*} \times \dot{U}_1 \right| \quad (18)$$

当相位差被完全消除时,  $S^* = 0$ 。虚拟功率的变化只受两端电压相位差  $\Delta\theta$  影响,因此可以通过跟踪线路上虚拟功率的变化得到需要补偿的相位大小。基于虚拟线路上功率的延时补偿原理见图 5,  $\omega t$  为初始相位,通过数字系统仿真的同步时钟获得;  $U'_{abc}$  为重构后三相电压信号。

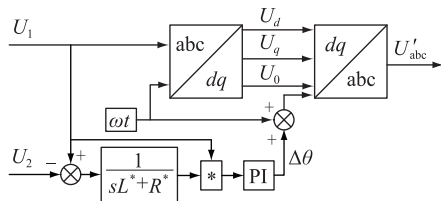


图 5 基于虚拟线路的相位补偿原理  
Fig.5 Principle of phase compensation based on virtual line

通过式(18)计算获得虚拟功率  $S^*$  后,将其作为误差信号送入比例积分 (proportional-integral, PI) 调节器,调节器输出需要补偿的相位补偿信号  $\Delta\theta$ 。对虚拟线路首端电压  $U_1$  进行 Park 变换,变换得到  $dq$  坐标系下的直流量  $U_d, U_q, U_0$ 。

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = P_1 \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:  $P_1$  为变换矩阵;  $U_a, U_b, U_c$  分别为  $U_1$  的三相电压分量。

$$P_1 = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin \omega t & -\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

将初始相位与补偿信号相加后,逆变换矩阵  $P_2$  变为:

$$P_2 = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \Delta\theta) & -\sin(\omega t + \Delta\theta) & 1 \\ \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \Delta\theta\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \Delta\theta\right) & 1 \\ \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \Delta\theta\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \Delta\theta\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

再对  $U_d, U_q, U_0$  进行 Park 逆变换,经过相位补偿后即可重新生成电压信号  $U'_a, U'_b, U'_c$ 。

$$\begin{bmatrix} U'_a \\ U'_b \\ U'_c \end{bmatrix} = P_2 \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

将经过逆变换后的电压信号作为功放的输入信号,物理侧即可获得一个相位相同的信号。当相位被完全补偿时,虚拟阻抗的取值对系统仿真精度的影响被完全消除。此时,  $Z^*$  可以在图 4 深色区域内任意取值,不同取值对仿真精度影响极小。相位补偿的加入使虚拟阻抗值取值变得相对自由,系统在获得较高稳定裕度的同时,精确性也获得了保证。

### 3 接口稳定性及精确性仿真分析

为验证基于虚拟线路补偿的改进 ITM 法应用于主动配电网混合仿真系统的有效性,及相对于现有算法在稳定性和精确性上的提升,在 Simulink 中搭建了如图 6 所示的主动配电网数字物理混合仿真系统模型。

数字侧为 IEEE 33 节点标准配电网,在配电网的节点 22 接有永磁同步机风力发电系统;物理侧通过功率接口接入配电网节点 13,物理侧分为无源的配电网馈线和光伏发电系统 2 种情况。仿真步长为

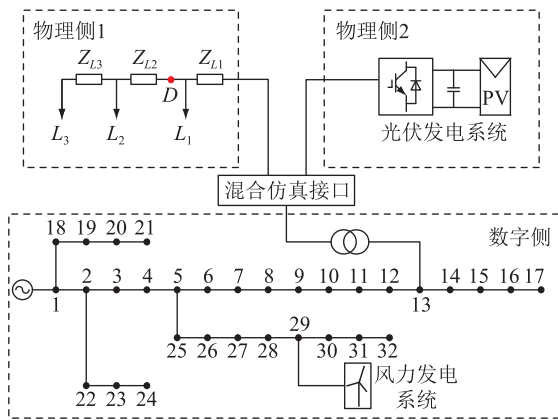


图6 主动配电网混合仿真结构

Fig.6 Hybrid simulation architecture for active distribution network

10  $\mu\text{s}$ ; 功放的延时设置为 500  $\mu\text{s}$ 。

### 3.1 主动配电网稳态及暂态仿真

为模拟实际情况,物理侧线路阻抗参数采用实验室现有的 10 kV 模拟线路实际参数,具体数值为:

$$\begin{cases} Z_{L1} = 0.28 + j0.479 \Omega \\ Z_{L2} = 0.70 + j3.815 \Omega \\ Z_{L3} = 0.28 + j0.479 \Omega \end{cases} \quad (23)$$

负荷  $L_1, L_2, L_3$  的有功功率均设置为 3 kW, 设置无功功率为 3 kvar; 线路电压等级为 800 V, 通过变压器接入数字侧配电网 13 节点。图 7 为 ITM 法下物理侧电压  $U_2$  的仿真波形。

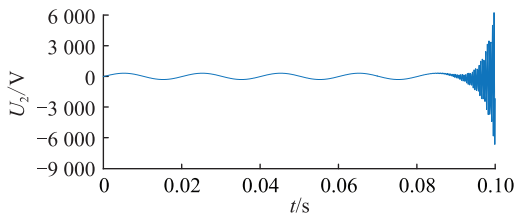


图7 ITM法下物理侧电压

Fig.7 Physical side voltage in ITM method

由图 7 可知,在功率接口采用 ITM 法时,由于数字侧阻抗大于物理侧,不满足 ITM 稳定的条件,仿真系统在约 0.08 s 后失去稳定。

虚拟线路阻抗中设定  $R^* = 1 \Omega, L^* = 0.01 \text{ H}$ 。0.2 s 时在  $D$  点设置三相直接接地短路故障,0.3 s 时故障切除。分别将 DIM、虚拟阻抗法、虚拟线路法与未添加功率接口的原始系统相对比。其中虚拟线路法为文中所提的基于虚拟线路补偿的改进 ITM 法;虚拟阻抗法为仅加入相同虚拟阻抗值的稳定性补偿,未使用精确性补偿的情况。以原始系统为标准,结合式(24),将绝对误差作为衡量精确性的指标,对接口处电压电流进行分析。

$$\Delta x = |x - x_{\text{orig}}| \quad (24)$$

式中: $x$  为需要进行对比的变量; $x_{\text{orig}}$  为变量在原始系统中的值。不同算法间物理侧输出的仿真电压  $U_2$  波形及故障前后绝对误差分析结果如图 8 所示,输出电流  $I_2$  波形及故障前后绝对误差分析结果如图 9 所示。

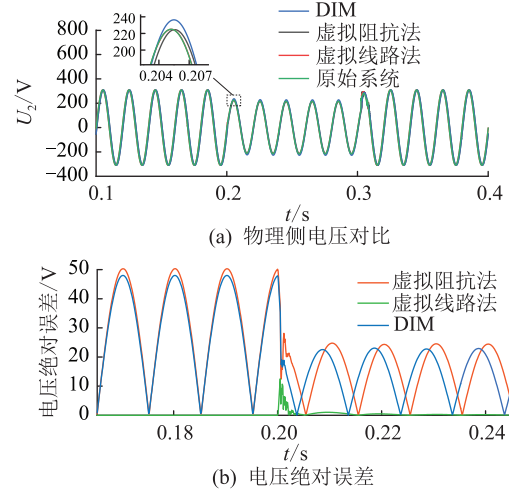


图8 故障前后不同接口算法电压对比

Fig.8 Voltage comparison of different interface algorithms before and after fault

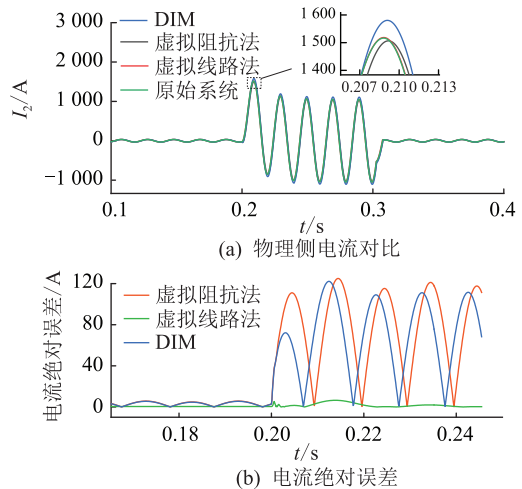


图9 故障前后不同接口算法电流对比

Fig.9 Current comparison of different interface algorithms before and after fault

相对于原始系统,不同算法的接口电压、电流绝对误差及电压相位差对比结果如表 1 所示,其中绝对误差均取仿真过程中的最大值。

表 1 不同算法性能对比

Table 1 Performance comparison of different algorithms

算法	电压绝对误差/V	电流绝对误差/A	相位差/ $^{\circ}$
虚拟线路法	15.32	3.17	0.054
DIM	48.62	122.57	8.920
虚拟阻抗法	51.07	126.58	9.030

由图 8 和图 9 可知,当接口为只采用稳定性补偿的虚拟阻抗法时,系统在故障前后可以一直保持稳定,说明了利用虚拟线路上流过的电流对数字侧受控电流源控制信号进行补偿,可有效提升仿真系统的稳定性。再结合表 1 分析可以发现,由于相位差的存在,只采用稳定性补偿时,接口处电压、电流存在较大的误差,并且稳定性补偿的加入会使电流误差进一步扩大。在根据虚拟线路上流过的虚拟功率对接口两侧的相位差进行补偿后,输出电压、电流波形与原始系统几乎重合,误差相对于其他 2 种算法显著降低,说明精确性补偿环节成功消除了稳定性补偿及固有延迟所引入的误差,大幅提升了仿真精度。虚拟线路上虚拟功率的流动情况如图 10 所示。

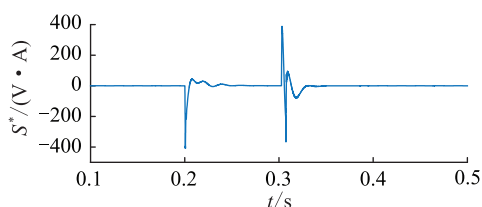


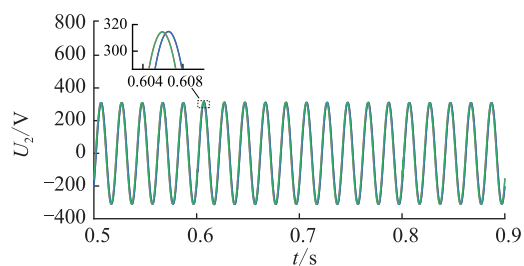
图 10 线路虚拟功率  
Fig.10 Line virtual power

可以发现当系统处于稳态时,虚拟功率趋近于 0。系统状态发生突变时,线路上产生大小为 400 V·A 的虚拟功率,在相位补偿环节的作用下经短暂的振荡后迅速衰减为 0,证明虚拟线路法能高效补偿相位差,且具有良好的鲁棒性。

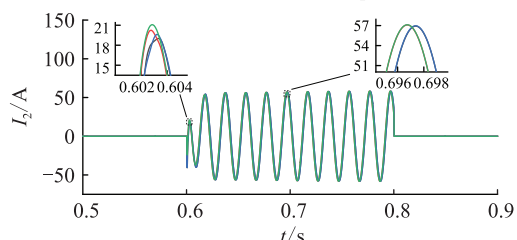
### 3.2 光伏并、离网过程仿真

光伏发电系统的额定功率为 30 kW,设置光伏发电系统 0.2 s 时并入配电网,0.4 s 时离网。虚拟线路阻抗设定  $R^* = 10 \mu\text{s}$ ,  $L^* = 0.05 \text{ H}$ ,分别将 ITM 法、虚拟阻抗法、虚拟线路法与原始系统作对比。不同算法间物理侧输出的仿真电压  $U_2$  波形如图 11 (a) 所示,电流  $I_2$  波形如图 11(b) 所示。

观察图 11(a) 可知,在光伏发电系统并网的暂态过程及并网后的稳态过程中,虚拟线路法的物理侧电压和原始系统的完全重合,而虚拟阻抗法和 ITM 法受到功放延迟的影响,电压均出现了相位的滞后与数值上的偏差。观察图 11(b) 可知,光伏并网的暂态过程中,虚拟线路法的电流在开始阶段与原始系统存在偏差,偏差随时间减小,并在 4 个周期后完全消除;而虚拟阻抗法和 ITM 法在暂态和稳态过程中均与原始系统存在较大偏差。在离网过程中,虚拟线路法的精确性也远高于其他 2 种算法。说明虚拟线路法在物理侧有源且含有非线性元件的情况下,依然具有良好的补偿效果。



(a) 物理侧电压  $U_2$  对比



(b) 物理侧电流  $I_2$  对比

— 虚拟阻抗法 — 虚拟线路法 — ITM 法 — 原始系统

图 11 不同接口算法物理侧仿真波形对比

Fig.11 Comparison of simulation waveforms on physical side of different interface algorithms

图 12 为采用虚拟线路法时,3 种不同阻抗取值下受控电流源控制信号  $I_1$  与原始系统的对比,其中:

$$\begin{cases} Z_1^* = 1 + j0.005\omega \Omega \\ Z_2^* = 10 + j0.05\omega \Omega \\ Z_3^* = 100 + j5\omega \Omega \end{cases} \quad (25)$$

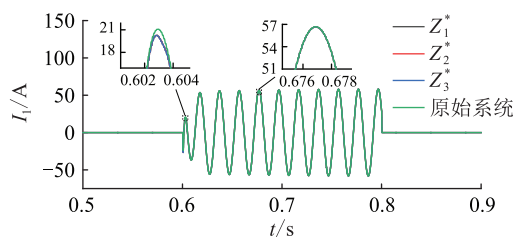


图 12 不同虚拟阻抗电流对比

Fig.12 Comparison of different virtual impedance currents

从图 12 中可以看出,当线路阻抗在稳定范围内取不同数值时,电流波形几乎没有变化。经计算,仿真过程中,不同阻抗取值下,电流绝对误差均保持在 1.6 A 以内,且相差不大。说明虚拟线路阻抗对仿真精度的影响被精确性补偿环节消除,线路阻抗的参数可在稳定范围内任意取值,不必再针对不同场景进行参数优化,大幅简化了接口参数选取过程。

## 4 实验验证

### 4.1 物理馈线故障实验

实验数字部分采用 IEEE 33 节点标准配电网,物理仿真子系统为 800 V 模拟 10 kV 电压等级的 3

条电缆线路,线路阻抗如式(23)所示,线路上带有3个可编程负载,有功功率均设置为3 kW,无功功率均设置为3 kvar。每条线路上都设有过流保护,在图6中的D点设有故障模拟器,可以实现物理侧多种故障模拟,物理侧通过功放接入物理侧节点13。在D点设置三相短路故障,短路电阻设置为 $20\ \Omega$ 。故障过程数字侧电压 $U_1$ 和功放实际输出电压 $U_2$ 对比如图13(a)所示,数字侧等效电流 $I_1$ 及功放实际输出电流 $I_2$ 波形对比如图13(b)所示,节点13的电压波形如图13(c)所示。

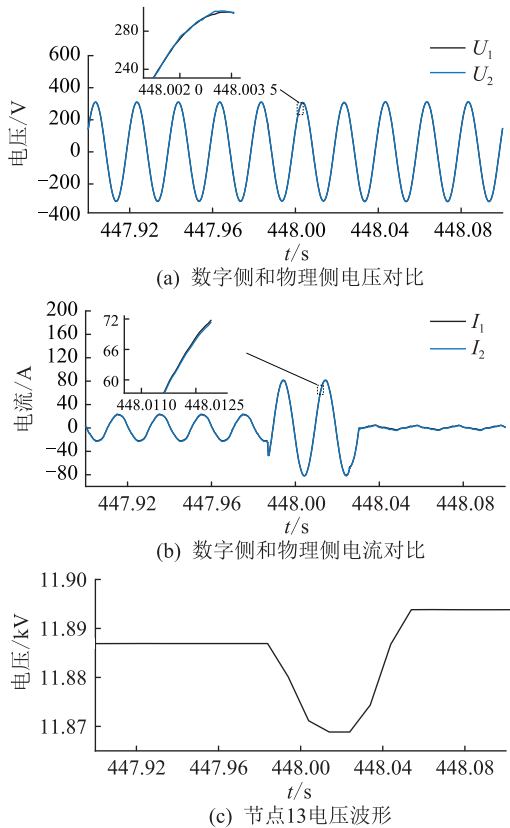


图13 物理侧三相短路故障实验

Fig.13 Experiment of three-phase short circuit fault on physical side

由图13可知,在物理侧发生三相短路故障后,数字侧及物理侧电流升高,电压降低,节点13电压降低。过流保护动作后,负荷 $L_2, L_3$ 及其所在线路被迅速切除,数字侧及物理侧电流比故障前有所减小,节点13电压升高。观察图13(a)和图13(b)可发现,当采用虚拟线路法时,系统可以一直保持稳定,物理侧和数字侧的电压电流波形保持一致。

为量化对比分析,文中对ITM法<sup>[19]</sup>、DIM<sup>[20]</sup>及虚拟阻抗法<sup>[23]</sup>也进行了实验。以实验过程中接口两侧电压、电流绝对误差极值、数字侧与物理侧电压相位差极值作为评价指标,与文中所提的虚拟线路法进行对比,对比结果如表2所示。

表2 故障实验时不同算法性能比较

Table 2 Performance comparison of different algorithms during failure experiments

算法	电压绝对误差极值/V	电流绝对误差极值/A	相位差极值/(°)
虚拟线路法	1.24	0.38	0.034
ITM法	失稳	失稳	失稳
DIM	15.22	3.61	1.830
虚拟阻抗法	17.36	4.54	1.910

由表2可知,文中方法相对于ITM法具有更强的稳定性,且精确性大幅优于DIM和虚拟阻抗法。虚拟线路法有效降低了电压、电流绝对误差,使用的相位补偿方法能高效补偿延时所引入的相位差,解决了虚拟阻抗引入带来的精确性问题。

#### 4.2 光伏并、离网实验

实验数字部分采用IEEE 33节点标准配电网,物理仿真子系统为380 V的光伏发电系统,最大输出功率设置为4 kW。选用ITM法和虚拟线路法2种接口算法进行实验。图14为光伏并网、离网过程中数字侧电压 $U_1$ 和功放实际输出电压 $U_2$ 的对比。

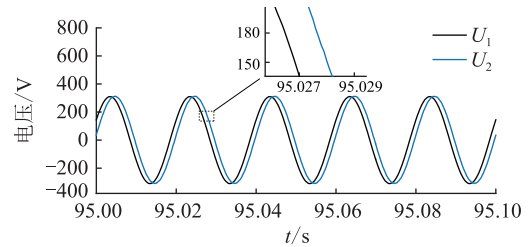


图14 ITM法下数字侧和物理侧电压对比

Fig.14 Voltage comparison between digital side and physical side in ITM method

由图14可以看出,使用ITM法时,在接口处电压存在 $100\ \mu\text{s}$ 左右的延迟,混合仿真系统存在较大误差。选用虚拟线路法的光伏并网过程中,数字侧电压 $U_1$ 和功放实际输出电压 $U_2$ 波形对比见图15(a),数字侧等效电流 $I_1$ 及功放实际输出电流 $I_2$ 波形对比见图15(b),功放输出电流波形见图15(c),注入配电网的有功功率见图15(d)。

对比图14和图15(a)可发现,使用了虚拟线路法后,功放及信号传输过程中产生的相位差被有效消除。文中方法与已有算法的实验数据量化分析对比结果如表3所示。

观察表3可以发现,虽然4种接口算法在实验过程中均能保持稳定,但ITM法、DIM、虚拟阻抗法的误差较大,物理侧与数字侧存在明显的相位差,仿真精度低。虚拟线路法的3项指标均明显优于其他3种算法,精确性更高。由表3、图15(a)和图15(b)可知,虚拟线路法的精度能满足主动配电网混

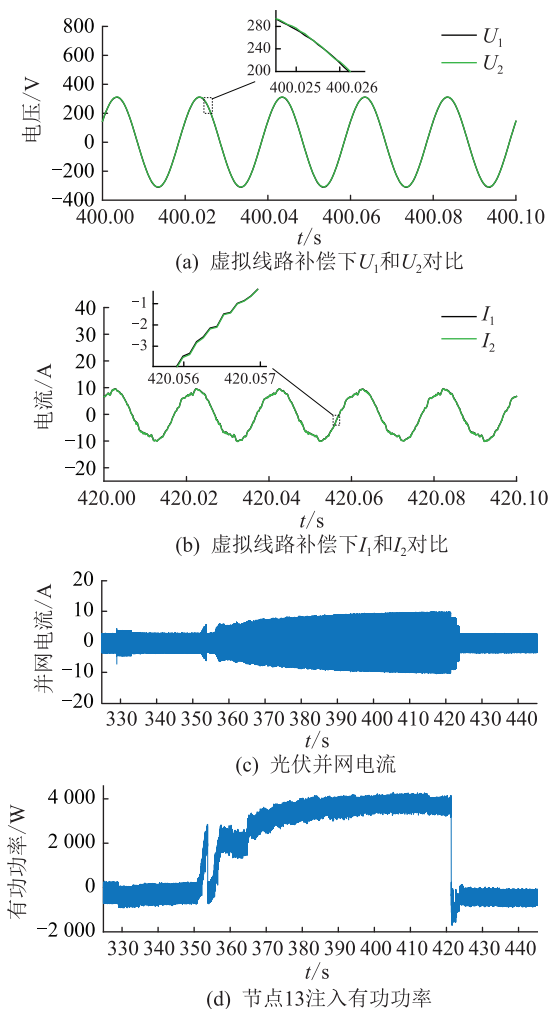


图 15 光伏并、离网实验

Fig.15 Photovoltaic grid-connected and off-grid experiments

表 3 光伏并、离网实验不同算法性能比较

Table 3 Comparison of the performance of different algorithms in photovoltaic grid-connected and off-grid experiments

算法	电压绝对误差极值/V	电流绝对误差极值/A	相位差极值/(°)
虚拟线路法	0.91	0.33	0.029
ITM 法	16.53	0.65	1.870
DIM	14.12	1.67	1.800
虚拟阻抗法	18.56	1.74	1.920

合仿真要求,实现了数字侧和物理侧同步运行,仿真接口“透明”。观察图 15(c)和图 15(d)可知,采用了虚拟线路法的主动配电网数字物理混合仿真系统,可以将分布式电源真实的动态响应反映到电网中,为今后相关研究打下了良好的基础。

## 5 结论

文中提出了一种基于虚拟线路补偿的数模混

合仿真接口算法,并以主动配电网混合仿真为应用场景对该方法进行了理论分析、仿真计算及实验验证,得到了如下结论:

(1) 当虚拟线路阻抗取值在稳定范围内时,虚拟线路的加入能提升混合仿真系统的稳定性。但只采用稳定性补偿时,虚拟阻抗的加入会降低系统的仿真精度。

(2) 精确性补偿策略在保证稳定性的同时,可以弥补稳定性补偿在精确度方面的缺陷。通过相位补偿,能使线路阻抗的取值变得相对自由。

(3) 在主动配电网故障,光伏并、离网混合仿真时,虚拟线路法相对于其他算法具有更高的稳定性和精度性。且所提方法实现简单,在实际硬件在环实验中能达到良好的效果。

### 参考文献:

[1] 刘东,张弘,王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术,2017,36(4):2-7,20.  
LIU Dong,ZHANG Hong,WANG Jianchun. Review on the state of the art of active distribution network technology research[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(4):2-7,20.

[2] 鞠平,周孝信,陈维江,等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):2-11.  
JU Ping,ZHOU Xiaoxin,CHEN Weijiang, et al. "Smart Grid Plus" research overview[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):2-11.

[3] 潘本仁,王和春,张妍,等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(15):102-107.  
PAN Benren,WANG Hechun,ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply [J]. Power System Protection and Control, 2020,48(15):102-107.

[4] 喻恒凝,黄力,张思东,等. 分布式光伏和电动汽车接入对配电网网损和电压偏移影响的分析研究[J]. 智慧电力,2020,48(1):28-34.  
YU Hengning,HUANG Li,ZHANG Sidong, et al. Effects of distributed photovoltaic generation and electric vehicle integrating into distribution network on line loss and voltage drift[J]. Smart Power,2020,48(1):28-34.

[5] 阎怀东,蔡立华,沙骏,等. 高比例新能源接入的配电网集群划分及电压控制[J]. 电力需求侧管理,2021,23(4):8-13.  
YAN Huaidong,CAI Lihua,SHA Jun, et al. Distribution network cluster division and voltage control with high proportion of new energy access[J]. Power Demand Side Management,2021,23(4):8-13.

[6] 曾杰,冷凤,陈晓科,等. 现代电力系统大功率数模混合实时仿真实现[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):166-171,178.  
ZENG Jie,LENG Feng,CHEN Xiaoke, et al. Implementation of high power digital-analog hybrid real-time simulation for modern power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(8):166-171,178.



- [7] 齐宁,程林,田立亭,等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化,2020,44(10):193-207.  
QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):193-207.
- [8] 闫桂杭,郝正航,陈卓,等. 数字-物理混合仿真实验平台研发及应用[J]. 实验技术与管理,2017,34(12):138-141,145.  
YAN Guihang, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Development and application of digital-physical hybrid simulation experimental platform[J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(12):138-141,145.
- [9] KOTSAMPOPOULOS P, LAGOS D, HATZIARGYRIOU N, et al. A benchmark system for hardware-in-the-loop testing of distributed energy resources[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2018, 5(3):94-103.
- [10] 韩林洁. 具有参数适应性的直流电网功率硬件在环仿真接口算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.  
HAN Linjie. Research on interface algorithm with parameter adaptability of power hardware-in-the-loop simulation for DC grid[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2021.
- [11] 蒲天骄,李焱,陈乃仕,等. 基于电力电子变压器的交直流混合系统优化运行控制关键技术及研究框架[J]. 电网技术,2018,42(9):2752-2759.  
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Key technology and research framework for optimal operation control of hybrid AC/DC system based on power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(9):2752-2759.
- [12] 崔晓丹,吴家龙,许剑冰,等. 电力系统硬件在环仿真应用的现状及展望[J]. 电力工程技术,2021,40(2):68-74.  
CUI Xiaodan, WU Jialong, XU Jianbing, et al. Current status and prospect of hardware-in-the-loop simulation in power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2):68-74.
- [13] 林雪华,郭琦,郭海平,等. 基于FPGA的柔性直流实时仿真技术及试验系统[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):33-39.  
LIN Xuehua, GUO Qi, GUO Haiping, et al. FPGA based real-time simulation technology and test system of flexible DC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):33-39.
- [14] HUERTA F, TELLO R L, PRODANOVIC M. Real-time power-hardware-in-the-loop implementation of variable-speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3):1893-1904.
- [15] 陈琪蕾. 配电网保护的数字物理混合仿真系统研究[D]. 上海:上海交通大学,2018.  
CHEN Qilei. Research on digital-physical hybrid simulation system for research of distribution network protection[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [16] 孙麒. 功率硬件在环仿真系统接口算法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.  
SUN Qi. Research on interface algorithms of power-hardware-in-the-loop simulation system[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2019.
- [17] RESCH S, FRIEDRICH J, WAGNER T, et al. Stability analysis of power hardware-in-the-loop simulations for grid applications[J]. Electronics, 2021, 11(1):7.
- [18] 杜燕,樊振东,杨向真,等. 功率硬件在环仿真系统的建模与稳定性分析[J]. 太阳能学报,2021,42(3):290-298.  
DU Yan, FAN Zhendong, YANG Xiangzhen, et al. Modeling and stability analysis of power hardware-in-the-loop simulation system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3):290-298.
- [19] MARKS N D, KONG W Y, BIRT D S. Stability of a switched mode power amplifier interface for power hardware-in-the-loop[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11):8445-8454.
- [20] 杨向真,孙麒,杜燕,等. 功率硬件在环仿真系统性能分析[J]. 电网技术,2019,43(1):251-262.  
YANG Xiangzhen, SUN Qi, DU Yan, et al. Performance analysis of power hardware-in-loop simulation[J]. Power System Technology, 2019, 43(1):251-262.
- [21] HONG M, HORIE S, MIURA Y, et al. A method to stabilize a power hardware-in-the-loop simulation of inductor coupled system[C]//Proceeding of International Conference on Power System Transients, Kyoto, Japan. 2009.
- [22] 乐健,张好,李星锐,等. 基于虚拟电阻补偿的柔性直流输电数模混合仿真系统的功率接口建模方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(18):5352-5360.  
LE Jian, ZHANG Hao, LI Xingrui, et al. A power interface modeling method of the digital-physical hybrid simulation system of MMC-HVDC system based on virtual resistance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18):5352-5360.
- [23] 乐健,张好,周谦,等. 基于虚拟阻抗补偿的数模混合仿真系统功率接口建模方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(7):1996-2005.  
LE Jian, ZHANG Hao, ZHOU Qian, et al. A power interface modeling method of the digital-physical hybrid simulation system based on virtual impedance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7):1996-2005.
- [24] PARAN S, EDRINGTON C S, VURAL B. Investigation of HIL interfaces in nonlinear load studies[C]//2012 North American Power Symposium (NAPS). Champaign, IL, USA. IEEE, 2012:1-6.
- [25] PARAN S, EDRINGTON C S. Improved power hardware in the loop interface methods via impedance matching[C]//2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, VA, USA. IEEE, 2013:342-346.
- [26] 胡宙宙,张沛超,方陈,等. 功率连接型数字物理混合仿真系统:(一)接口算法特性[J]. 电力系统自动化,2013,37(7):36-41.  
HU Yuzhou, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Power hardware-in-the-loop simulation system; part one characteristics of interface algorithms[J]. Automation of Electric Power Sys-

tems, 2013, 37(7):36-41.

[27] GUILLO-SANSANO E, ROSCOE A J, JONES C E, et al. A new control method for the power interface in power hardware-in-the-loop simulation to compensate for the time delay [C]// 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Cluj-Napoca, Romania. IEEE, 2014: 1-5.

[28] 李国庆, 王一捷, 熊毅. MMC-HVDC 功率硬件在环仿真的 SDIM-ITM 接口算法与延时补偿[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3):56-63.

LI Guoqing, WANG Yijie, XIONG Yi. SDIM-ITM interface algorithm and time delay compensation for a power hardware-in-the-loop simulation of MMC-HVDC[J]. Power System Protec-

tion and Control, 2019, 47(3):56-63.

作者简介:



鄂涛

鄂涛(1997),男,硕士在读,研究方向为主动配电网、数字物理混合仿真(E-mail:892891-204@qq.com);

尹忠东(1968),男,博士,教授,研究方向为大规模电力电子化电网同步实时仿真、电能质量分析与控制;

王群飞(1997),男,硕士在读,研究方向为主动配电网、充电设施故障检测。

### Implementation method of hybrid simulation interface for active distribution network based on virtual line compensation

E TAO, YIN Zhongdong, WANG Qunfei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electrical Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** Digital physical hybrid simulation is an effective means of active distribution network simulation and analysis, and the interface algorithm is the key to ensuring the stability and accuracy of the system. Aiming at the problem that the existing interface algorithm cannot be applied to the hybrid simulation of active distribution network, an improved power interface algorithm based on virtual line compensation is proposed. Firstly, based on the analysis of the structure and stability conditions of the ideal transformer model (ITM) method, it is proposed to add a virtual line between the digital side and the physical side. Then, the stability of the system is compensated based on the virtual current on the line, and a range of values for the line impedance is given. At the same time, for the errors introduced by the inherent delay and stability compensation of the interface, it is proposed to compensate the phase difference between the two sides of the interface according to the virtual power flowing on the virtual line to ensure the accuracy. Finally, the proposed method is compared with the ITM method, damping impedance method and virtual impedance method by simulation and experiment. The results show that the proposed method is effective and superior in improving the stability and accuracy of the hybrid simulation system of active distribution network.

**Keywords:** digital physical hybrid simulation; active distribution network; virtual line compensation; power interface algorithm; power hardware-in-the-loop; ideal transformer model (ITM)

(编辑 陆海霞)