

# 高压直流输电系统三相动态相量建模与仿真

赵云灏, 刘崇茹, 李庚银, 贞飞龙

(华北电力大学(新能源电力系统国家重点实验室), 北京 102206)

**摘要:** 建立了高压直流输电(HVDC)系统的三相动态相量模型, 能快速反映交流系统对称与不对称运行情况下 HVDC 系统的动态特性。建模过程中, 通过分析换流器的开关和换相过程, 修正了换流器的开关函数模型; 根据直流系统频率特性, 使用动态向量理论建立含换流器、直流线路和控制系统的完整的 HVDC 三相动态相量模型。将 HVDC 系统三相动态相量模型和电磁暂态模型仿真结果比较, 验证了 HVDC 系统三相动态相量模型的正确性和有效性。

**关键词:** 建模; 高压直流输电; 动态相量; 开关函数

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 04-0752-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704007

## Modeling and Simulation of HVDC Systems by Three-Phase Dynamic Phasor

Zhao Yunhao, Liu Chongru, Li Gengyin, Yun Feilong

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

**Abstract:** A three-phase dynamic phasor (TPDP) model of High Voltage Direct Current (HVDC) systems was proposed. The proposed model could rapidly solve the dynamic characteristics of HVDC systems for AC system symmetrical and asymmetrical operating conditions. *Switch functions model of converter was enhanced according to commutation process analysis of the converter. Due to the frequency characteristics analysis results, the TPDP model of HVDC systems with the converter, DC line and controller were established through dynamic phasor theory.* Simulation results show that the proposed model is effective and acceptable..

**Keywords:** modeling; HVDC; dynamic phase; switch functions

## 引言

高压直流输电技术因其在远距离大容量输电中的优势, 在国内外得到广泛应用。尤其在中国, 截止 2014 年, 已有 19 项直流输电工程投入使用, 规划建设中的直流输电工程超过 15 项。中国电网

已成为当今世界含多回直流输电工程最多、最复杂的互联电网<sup>[1]</sup>。为研究交直流系统之间的相互作用, 建立不同详细程度、适合不同研究用途的高压直流输电系统模型成为当前的研究热点。

目前电力系统时域仿真中广泛使用的直流系统输电模型可分为两类: 电磁暂态模型<sup>[2]</sup>和准稳态模型<sup>[3]</sup>。通常认为电磁暂态模型计算精确, 但是电磁暂态计算所使用的差分计算模型占用的计算机容量大, 不利于大系统仿真; 准稳态模型使用相量模型占用的计算机容量较小, 可进行大系统仿真, 但该模型建立在交流系统考虑基波分量且三相对



收稿日期: 2015-06-30 修回日期: 2015-11-27;  
基金项目: 国家自然科学基金(51277068), 国家 863 计划(2015AA050101), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0846), 高等学校学科创新引智计划("111"计划)(B08013), 北京市国内外联合培养研究生共建项目;  
作者简介: 赵云灏(1988-), 男, 河北, 博士生, 研究方向为交直流混合系统仿真与控制。

<http://www.china-simulation.com>

称的前提下, 仅能反映交流系统对称情况下直流系统的动态特性。

为解决仿真精度和仿真规模的矛盾, 动态相量理论被引入电力系统建模仿真中<sup>[4]</sup>, 通过对时变信号的傅里叶变换, 导出其主导分量对应的时变傅里叶系数, 建立相应的动态相量模型以反映元件的动态特性。动态相量模型将电磁暂态仿真中电力电子换流器的非线性差分模型转换为代数模型, 同时可以根据模型准确性的需要选取系统中占主导地位的频率特性信号来反映系统的动态特性。该方法已在电力电子装置的建模和研究中得到广泛应用, 如 HVDC 系统<sup>[5-6]</sup>、HVDC 系统换流器<sup>[7-8]</sup>、并网逆变器<sup>[9-10]</sup>以及变流器<sup>[11-13]</sup>等。

文献[5-6]建立的高压直流输电系统动态相量模型基于交流系统三相对称这一假设前提, 不能反映交流系统不对称故障下 HVDC 系统的动态特性。文献[7-8]建立了交流系统不对称情况下 HVDC 系统换流器的动态相量模型, 但没有考虑带有直流线路和控制器的完整的交流系统不对称情况下的 HVDC 系统动态相量模型。文献[7]采用的开关函数忽略了换相重叠角产生的偏移, 不能准确反映换流器开关和换相过程; 文献[8]中换流器的动态相量模型直流侧仅考虑了直流量, 忽略了交流侧三相不对称时直流侧的谐波特性, 不能完全体现动态相量模型能选择反映系统动态特性的主导频率信号的特点。

本文在上述研究的基础上, 考虑不对称故障情况下换相重叠角产生的偏移, 建立了换流器的开关函数模型; 并根据交流系统不对称故障下 HVDC 系统的频率特性和直流系统谐波特性, 建立了包含控制系统的完整的 HVDC 系统三相动态相量模型。该模型包括换流器和直流线路的三相动态相量模型以及控制系统的动态相量模型; 并给出了该三相动态向量模型的仿真计算流程, 在 MATLAB 中编程实现了 HVDC 三相动态向量仿真。最后, 将 HVDC 三相动态相量模型仿真结果与 PSCAD/EMTDC 中的 HVDC 电磁暂态模型仿真结果进行了对比, 验证了所提 HVDC 系统三相动态相量模型的有效性和准确性, 扩展了 HVDC 系统

动态相量模型的适用性。

## 1 考虑换相重叠角偏移的开关函数模型

图 1 中,  $L_r$  和  $L_i$  分别为整流器和逆变器的换相电抗,  $L_d$  为直流线路平波电抗,  $R_d$  为直流线路电阻,  $C_d$  为直流线路对地寄生电容,  $v_{dr}$  和  $i_{dr}$  分别表示整流器直流侧的电压和电流,  $v_{di}$  和  $i_{di}$  分别表示逆变器直流侧的电压和电流,  $v_{dc}$  和  $i_{dc}$  为直流电容的电压和电流,  $v_{ra}$ 、 $v_{rb}$ 、 $v_{rc}$ 、 $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  分别表示整流器交流侧电压和电流,  $v_{ia}$ 、 $v_{ib}$ 、 $v_{ic}$ 、 $i_{ia}$ 、 $i_{ib}$ 、 $i_{ic}$  分别表示逆变器交流侧电压和电流。

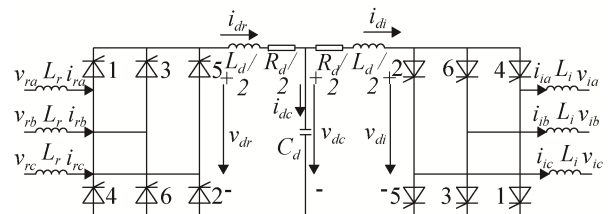


图 1 直流输电系统示意图

Fig. 1 Sketch of HVDC transmission system

图 2 所示的开关函数考虑了换相重叠角的偏移作用, 能准确反映换流器的开关和换相过程。其中,  $\alpha$  表示触发角,  $\mu$  表示换相重叠角, 其傅里叶级数表达式为:

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\mu}{2}\right) \cos\left(n\left(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2}\right)\right) \quad (1)$$

式中:  $n$  为正整数。  $A_n = (4/\pi n) \sin(\pi n/2) \cos(\pi n/6)$ , 当  $n$  为 2 或 3 的倍数时  $A_n = 0$ 。

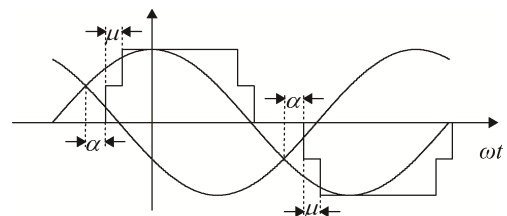


图 2 本文采用的开关函数波形示意图

Fig. 2 Sketch of the proposed switching function

假设三相电压瞬时表达式为

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \cos(\omega t + \varphi_{va}) \\ V_b \cos(\omega t + \varphi_{vb} - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c \cos(\omega t + \varphi_{vc} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $\varphi_{va}$ 、 $\varphi_{vb}$ 、 $\varphi_{vc}$  为三相电压的初始相位角。

忽略换流器换相角  $\mu$  因  $\varphi_{va}$ 、 $\varphi_{vb}$ 、 $\varphi_{vc}$  引起的误差，换流器换相角  $\mu$  可由式 (7) 计算得到<sup>[7]</sup>，

$$\mu = \cos^{-1}(\cos \alpha - \frac{\sqrt{2}X_r i_d}{E}) - \alpha \quad (3)$$

式中： $X_r$  为换流变压器的漏抗， $E$  为换流变压器低压侧电压的有效值。

此时，换流器的电压开关函数和电流开关函数可以表示为：

$$\begin{cases} S_{va} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\frac{n\mu}{2}) \cos n(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2} + \varphi_{va}) \\ S_{vb} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\frac{n\mu}{2}) \cos n(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2} + \varphi_{vb} - \frac{2\pi}{3}) \\ S_{vc} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\frac{n\mu}{2}) \cos n(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2} + \varphi_{vc} + \frac{2\pi}{3}) \\ S_{ia} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu/2)}{n\mu} \cos n(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2} + \varphi_{va}) \\ S_{ib} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu/2)}{n\mu} \cos n(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2} + \varphi_{vb} - \frac{2\pi}{3}) \\ S_{ic} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu/2)}{n\mu} \cos n(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2} + \varphi_{vc} + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (4)$$

## 2 HVDC 系统三相动态相量模型

根据 HVDC 系统结构，完整的 HVDC 系统三相动态相量模型包括 HVDC 系统整流器、逆变器三相动态相量模型，直流线路三相动态相量模型以及控制系统动态相量模型三部分。下面给出三部分详细的模型。

### 2.1 换流器三相动态相量模型

交流系统发生不对称故障时反映交直流系统动态特性的主要非特征谐波为直流系统直流侧直流电压和直流电流包含直流量和 2 次谐波分量，换流器交流侧交流电流包含基波分量和 3 次谐波分量<sup>[7]</sup>。

再根据本文换流器开关函数模型以及换流器

调制理论<sup>[14]</sup>和动态相量理论<sup>[7]</sup>，假设电力系统的基波频率为  $f_0$ ，交流系统发生不对称故障时 HVDC 系统整流器三相动态相量模型的直流侧直流电压  $v_{dr}$  动态相量为：

$$\begin{aligned} \langle v_{dr} \rangle_0(t) &= \frac{1}{2}(V_{ra}(t) + V_{rb}(t) + \\ &V_{rc}(t)) A_1 \cos \frac{\mu_r(t)}{2} \cos(\alpha_r(t) + \frac{\mu_r(t)}{2}) \\ \langle v_{dr} \rangle_2(t) &= \frac{A_1}{4} \cos \frac{\mu_r(t)}{2} (V_{ra}(t) e^{j(-\alpha_r(t) - \frac{\mu_r(t)}{2} + 2\varphi_{ra})} + \\ &V_{rb}(t) e^{j(-\alpha_r(t) - \frac{\mu_r(t)}{2} + 2\varphi_{rb} - \frac{4\pi}{3})} + \\ &V_{rc}(t) e^{j(-\alpha_r(t) - \frac{\mu_r(t)}{2} + 2\varphi_{rc} + \frac{4\pi}{3})}) \end{aligned} \quad (6)$$

HVDC 系统整流器三相动态相量模型的交流侧交流电流  $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  动态相量为：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \langle i_{ra} \rangle_1(t) \\ \langle i_{rb} \rangle_1(t) \\ \langle i_{rc} \rangle_1(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \langle i_{dr} S_{ira} \rangle_1(t) \\ \langle i_{dr} S_{irb} \rangle_1(t) \\ \langle i_{dr} S_{irc} \rangle_1(t) \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} \langle i_{dr} \rangle_0(t) \langle S_{ira} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{ira} \rangle_1^*(t) \\ \langle i_{dr} \rangle_0(t) \langle S_{irb} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{irb} \rangle_1^*(t) \\ \langle i_{dr} \rangle_0(t) \langle S_{irc} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{irc} \rangle_1^*(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \langle i_{ra} \rangle_3(t) \\ \langle i_{rb} \rangle_3(t) \\ \langle i_{rc} \rangle_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \langle i_{dr} S_{ira} \rangle_3(t) \\ \langle i_{dr} S_{irb} \rangle_3(t) \\ \langle i_{dr} S_{irc} \rangle_3(t) \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{ira} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2^*(t) \langle S_{ira} \rangle_5(t) \\ \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{irb} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2^*(t) \langle S_{irb} \rangle_5(t) \\ \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{irc} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2^*(t) \langle S_{irc} \rangle_5(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \langle S_{ira} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_r(t)} \sin \frac{n\mu_r(t)}{2} e^{jn(-\alpha_r(t) - \frac{\mu_r(t)}{2} + \varphi_{ra})} \\ \langle S_{irb} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_r(t)} \sin \frac{n\mu_r(t)}{2} e^{jn(-\alpha_r(t) - \frac{\mu_r(t)}{2} + \varphi_{rb} - \frac{2\pi}{3})} \\ \langle S_{ira} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_r(t)} \sin \frac{n\mu_r(t)}{2} e^{jn(-\alpha_r(t) - \frac{\mu_r(t)}{2} + \varphi_{rc} + \frac{2\pi}{3})} \end{aligned} \quad (8)$$

逆变器的三相动态相量模型的推导与整流器的三相动态相量模型相似，不在此重复。

## 2.2 直流线路三相动态相量模型

如图 1 所示的直流系统中, 直流线路的微分方程为

$$\begin{cases} \frac{L_d}{2} \frac{di_{dr}}{dt} = v_{dr} - v_{dc} - \frac{R_d}{2} i_{dr} \\ \frac{L_d}{2} \frac{di_{di}}{dt} = v_{dc} - v_{di} - \frac{R_d}{2} i_{di} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} \end{cases} \quad (9)$$

根据 HVDC 系统直流侧频率特性<sup>[7]</sup>, 由式(9)可以得到 HVDC 系统直流线路三相动态相量模型为:

$$\begin{cases} \frac{L_d}{2} \frac{d\langle i_{dr} \rangle_0}{dt} = \langle v_{dr} \rangle_0 - \langle v_{dc} \rangle_0 - \frac{R_d}{2} \langle i_{dr} \rangle_0 \\ \frac{L_d}{2} \frac{d\langle i_{di} \rangle_0}{dt} = \langle v_{dc} \rangle_0 - \langle v_{di} \rangle_0 - \frac{R_d}{2} \langle i_{di} \rangle_0 \\ C_{dc} \frac{d\langle v_{dc} \rangle_0}{dt} = \langle i_{dc} \rangle_0 \\ \frac{L_d}{2} \frac{d\langle i_{dr} \rangle_2}{dt} = \langle v_{dr} \rangle_2 - \langle v_{dc} \rangle_2 - \frac{R_d}{2} \langle i_{dr} \rangle_2 - j\omega L_d \langle i_{dr} \rangle_2 \\ \frac{L_d}{2} \frac{d\langle i_{di} \rangle_2}{dt} = \langle v_{di} \rangle_2 - \langle v_{dc} \rangle_2 - \frac{R_d}{2} \langle i_{di} \rangle_2 - j\omega L_d \langle i_{di} \rangle_2 \\ C_{dc} \frac{d\langle v_{dc} \rangle_2}{dt} = \langle i_{dc} \rangle_2 - j2\omega C_{dc} \langle v_{dc} \rangle_2 \end{cases} \quad (10)$$

## 2.3 控制系统三相动态相量模型

HVDC 系统控制系统一般为整流侧定电流控制, 逆变侧定电流控制和逆变侧定熄弧角控制, 并配以电流偏差控制和低压限流控制等<sup>[15]</sup>。

整流侧定电流控制结构框图如图 3 所示。\$K\_r\$ 和 \$T\_r\$ 分别为 PI 控制器的比例常数和积分时间常数。\$i\_{dr}\$ 为整流侧直流线路电流的测量值, \$i\_{drref}\$ 为整流侧定电流控制的直流电流参考值, \$\beta\_r\$ 和 \$\alpha\_r\$ 分别为整流器的超前触发角和触发角。

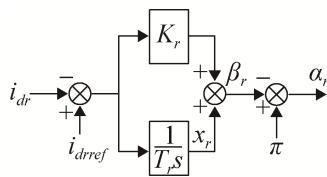


图 3 整流侧定电流控制器结构框图  
Fig. 3 Diagram of constant current controller in rectifier side

整流侧定电流控制的动态方程为:

$$\frac{dx_r}{dt} = -\frac{1}{T_r} i_{dr} + \frac{1}{T_r} i_{drref} \quad (11)$$

$$\alpha_r(t) = \pi - x_r(t) - K_r(i_{drref}(t) - i_{dr}(t)) \quad (12)$$

考虑实际系统中测量环节的滤波作用, 控制系统考虑 0 阶动态相量, 整流侧定电流控制的动态相量模型为:

$$\frac{d\langle x_r \rangle_0}{dt} = -\frac{1}{T_r} \langle i_{dr} \rangle_0 + \frac{1}{T_r} i_{drref} \quad (13)$$

$$\alpha_r = \pi - \langle x_r \rangle_0 - K_r(i_{drref} - \langle i_{dr} \rangle_0) \quad (14)$$

逆变侧定电流控制的结构与整流侧定电流控制的结构相同, 为维持控制系统稳定, 逆变侧定电流控制直流电流参考值比整流侧定电流控制直流电流参考值低 10%。

逆变侧采用定熄弧角控制并配以电流偏差控制时, 逆变侧直流电压为:

$$v_{di} = v_{di0} \cos(\gamma_{ref} + \gamma_{err}) - \frac{3}{\pi} \omega L_i i_{di} \quad (15)$$

式中: \$\gamma\_{ref}\$ 为逆变侧定熄弧角控制的熄弧角参考值, \$\gamma\_{err}\$ 为电流偏差控制输出的熄弧角增量。逆变器直流电压又可用触发超前角 \$\beta\_i\$ 表示为:

$$v_{di} = v_{di0} \cos \beta_i + \frac{3}{\pi} \omega L_i i_{di} \quad (16)$$

联立式(13)和式(14)可得到逆变侧定熄弧角控制器的控制规律:

$$\beta_i(t) = \arccos(\cos(\gamma_{ref} + \gamma_{err}(t)) - \frac{6}{\pi v_{di0}(t)} \omega L_i i_{di}(t)) \quad (17)$$

$$\alpha_i(t) = \pi - \beta_i(t) \quad (18)$$

因此逆变侧定熄弧角控制器的动态相量模型为:

$$\beta_i = \arccos(\cos(\gamma_{ref} + \gamma_{err}) - \frac{6}{\pi \langle v_{di0} \rangle_0} \omega L_i \langle i_{di} \rangle_0) \quad (19)$$

$$\alpha_i = \pi - \beta_i \quad (20)$$

各控制器之间的配合文献<sup>[15]</sup>已做详细说明, 本文在此不做赘述。

### 3 三相动态相量模型仿真过程

为方便获得模型输入量，模型仿真过程中输入量为交流系统三相电压的时域值，输出量为直流电压、电流和交流电流的时域值，模型内部仿真过程中使用动态向量进行计算。因此仿真过程中需要动态向量和时域值之间的转换。

根据动态相量定义，当仿真步长为  $\Delta t$  时，时域值到第  $k$  阶动态相量的转换关系为

$$\langle X \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\frac{2\pi}{T}\tau} d\tau = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t-T+n\Delta t) e^{-jk\frac{2\pi}{T}(t-T+n\Delta t)} \quad (21)$$

式中： $N=T/\Delta t$ 。

HVDC 系统三相动态相量模型的直流侧直流电压  $v_d$ 、直流电流  $i_d$  和交流侧交流电流  $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  动态相量到时域值的转换关系为：

$$v_d(t) = \langle v_d \rangle_0(t) + \langle v_d \rangle_2(t) e^{j2\omega t} + \langle v_d \rangle_{-2}(t) e^{-j2\omega t} = \langle v_d \rangle_0(t) + 2\text{Re}(\langle v_d \rangle_2(t) e^{j2\omega t}) \quad (22)$$

$$i_d(t) = \langle i_d \rangle_0(t) + \langle i_d \rangle_2(t) e^{j2\omega t} + \langle i_d \rangle_{-2}(t) e^{-j2\omega t} = \langle i_d \rangle_0(t) + 2\text{Re}(\langle i_d \rangle_2(t) e^{j2\omega t}) \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_1(t) \\ \langle i_b \rangle_1(t) \\ \langle i_c \rangle_1(t) \end{bmatrix} e^{j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{-1}(t) \\ \langle i_b \rangle_{-1}(t) \\ \langle i_c \rangle_{-1}(t) \end{bmatrix} e^{-j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_3(t) \\ \langle i_b \rangle_3(t) \\ \langle i_c \rangle_3(t) \end{bmatrix} e^{j3\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{-3}(t) \\ \langle i_b \rangle_{-3}(t) \\ \langle i_c \rangle_{-3}(t) \end{bmatrix} e^{-j3\omega t} = 2\text{Re} \left( \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_1(t) \\ \langle i_b \rangle_1(t) \\ \langle i_c \rangle_1(t) \end{bmatrix} e^{j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_3(t) \\ \langle i_b \rangle_3(t) \\ \langle i_c \rangle_3(t) \end{bmatrix} e^{j3\omega t} \right) \quad (24)$$

HVDC 三相动态相量模型仿真计算方法为：将直流线路的动态相量模型和控制器模型差分化，再将差分化的直流线路动态相量模型和控制器模型与换流器动态向量模型配合进行仿真。含控制系统的高压直流输电系统三相动态相量模型仿真程序总体框图如图 4 所示，仿真过程中换流器、直流线路与控制系统存在一步时滞。

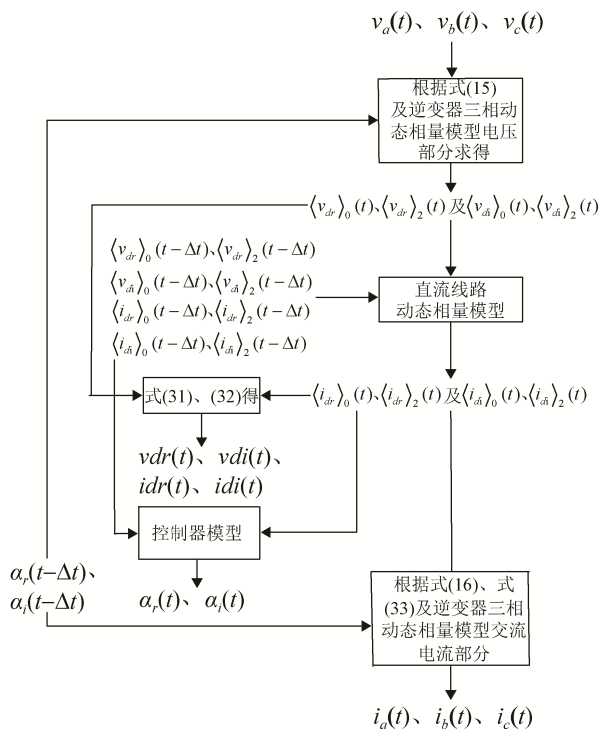


图 4 HVDC 三相动态相量模型仿真框图

Fig. 4 Diagram of simulation of HVDC three-phase dynamic phasor model

换流器、直流线路及控制器动态相量模型相互配合的整体仿真程序步骤如下：

步骤 1：将直流线路的三相动态相量模型和控制器中定电流控制器模型差分化；

步骤 2：设置仿真初始时刻  $t_0$ ，仿真结束时刻  $t_{end}$  以及仿真步长  $\Delta t$ （本文设  $\Delta t=100 \mu s$ ）；

步骤 3：模型输入量为整流侧和逆变侧 abc 三相交流系统电压  $v_{ar}$ 、 $v_{br}$ 、 $v_{cr}$ 、 $v_{ai}$ 、 $v_{bi}$ 、 $v_{ci}$ ，整流侧和逆变侧触发角的仿真初值  $\alpha_r(t_0 - \Delta t)$ 、 $\alpha_i(t_0 - \Delta t)$  以及直流侧直流电压、电流动态相量仿真初值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dr} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 。并根据式(21)计算得到整流侧和逆变侧 abc 三相交流系统电压动态相量值。

步骤 4： $t$  时刻整流侧和逆变侧 abc 三相交流系统电压动态相量值送入式(6)及逆变侧三相动态相量模型的电压部分计算得到  $t$  时刻直流侧直流电压动态相量值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{dr} \rangle_2(t)$  及  $\langle v_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t)$ 。

步骤 5： $t$  时刻直流侧直流电压动态相量值

$\langle v_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t)$  及  $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$  时刻直流侧直流电压、电流动态相量值  $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$  送入差分后的直流线路动态相量模型计算得到  $t$  时刻直流侧直流电流动态相量值  $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t)$  及  $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t)$ 。

步骤 6:  $t$  时刻直流侧直流电流动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t)$  及  $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t)$  送入式 (22)、(23) 计算得到  $t$  时刻直流侧直流电压、电流的时域值  $v_{dr}(t)$ 、 $v_{di}(t)$  和  $i_{dr}(t)$ 、 $i_{di}(t)$ 。

步骤 7:  $t$  时刻直流侧直流电流动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t)$  及  $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t)$ 、 $t - \Delta t$  时刻整流侧和逆变侧触发角  $\alpha_r(t - \Delta t)$ 、 $\alpha_i(t - \Delta t)$  送入式 (7)、式 (24) 以及逆变器三相动态相量模型交流电流部分计算得到  $t$  时刻时域值

步骤 8:  $t$  时刻直流侧直流电流动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t)$  及  $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t)$ 、 $t - \Delta t$  时刻直流侧直流电压、电流动态相量值  $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$  送入控制器模型计算得到  $t$  时刻整流侧和逆变侧的触发角  $\alpha_r(t)$ 、 $\alpha_i(t)$ 。

步骤 9: 检测是否为仿真结束时刻  $t_{end}$ , 如果是, 则仿真结束; 如果不是, 则  $t=t+\Delta t$ , 返回步骤 3 循环。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真系统

仿真系统为图 5 所示的单极十二脉动 HVDC 系统。整流器交流侧电压 345 kV, 整流侧换流变压器变比为 345/213.4557, 逆变器交流侧电压 230 kV, 逆变侧换流变压器变比为 230/209.2288, 直流线路电压 500 kV, 系统频率 50 Hz。直流线路电阻 5  $\Omega$ , 直流线路平波电感 1.19 H, 直流线路对地电容 50  $\mu\text{F}$ 。

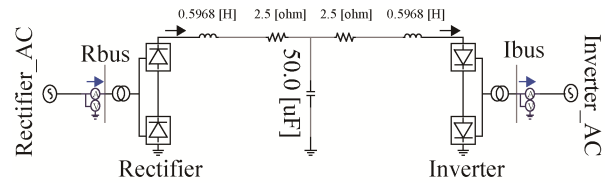


图 5 单极十二脉动 HVDC 系统  
Fig. 5 The monopole 12-pulse HVDC system

控制系统为整流侧定电流控制, 逆变侧定熄弧角控制, 并有完整的电流偏差控制和低压限流控制系统。

在电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC 中, 建立了图 5 所示的 HVDC 系统的电磁暂态模型。应用推导的 HVDC 系统三相动态相量模型, 在 Matlab 中使用 Matlab 程序语言编程实现了该 HVDC 系统的动态相量仿真程序。

### 4.2 仿真结果

为验证 HVDC 系统三相动态相量模型的有效性, 使用所建模型进行了 3 种故障类型下的仿真对比, 并与文献[7]的动态相量模型进行了对比。其中动态相量模型仿真步长  $\Delta t=100 \mu\text{s}$ , 电磁暂态模型仿真步长  $\Delta t=100 \mu\text{s}$ 。故障类型如表 1 所示, 其中逆变侧故障考虑了不引起换相失败的故障类型, 即逆变侧交流系统发生经过渡电阻接地故障。

表 1 仿真故障类型  
Tab. 1 Fault types in simulation

故障类型	故障描述
故障 1	整流侧交流系统在 1.5 s 时发生持续时间 0.05 s 的 a 相金属性接地故障
故障 2	整流侧交流系统在 1.5s 时发生持续时间 0.1 s 的 a 相金属性接地故障, 在 1.54 s 发生持续时间 0.05 s 的 b 相金属性接地故障
故障 3	逆变侧交流系统在 1.5 s 时发生持续时间 0.1 s 的 a 相经电阻 $R_g$ 接地故障, $R_g=450 \Omega$

三种不对称故障下 HVDC 系统三相动态相量模型和电磁暂态模型的直流电压、直流电流和逆变侧交流电流的仿真结果对比分别如图 6~8 所示。其中  $V_{ATPDP}$ 、 $I_{ATPDP}$  是本文所建的 HVDC 系统动态相量模型得到的直流电压和直流电流;  $V_{dR}$ 、 $I_{dR}$  是综合文献[7]建立的 HVDC 系统换流器动态相量模型

得到的 HVDC 系统动态相量模型得到的直流电压和直流电流;  $V_{dEMT}$ 、 $I_{dEMT}$  是 HVDC 系统电磁暂态模型得到的直流电压和直流电流。

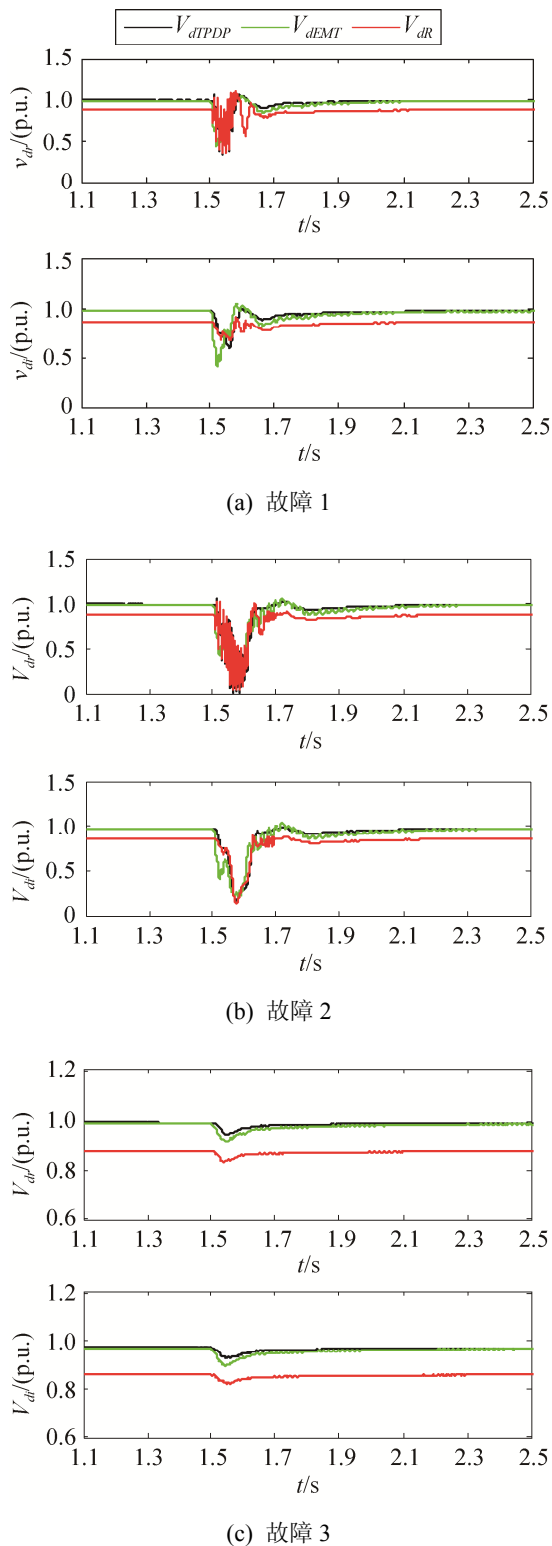


图 6 直流电压仿真结果对比  
Fig. 6 Comparison of DC voltage simulation results

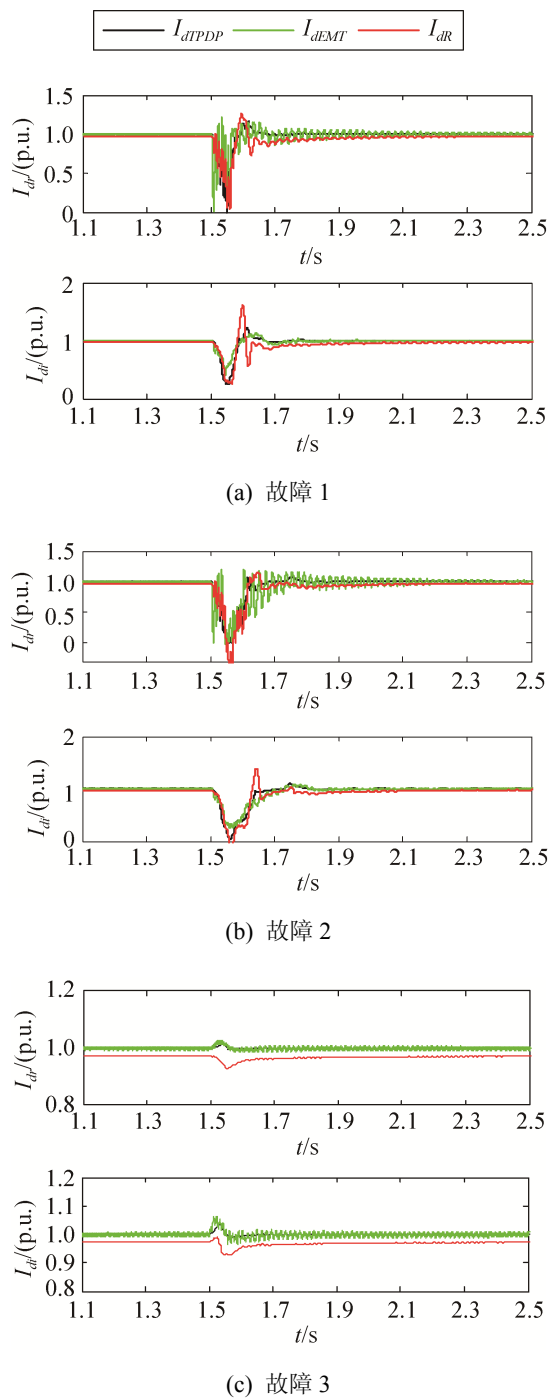


图 7 直流电流仿真结果对比  
Fig. 7 Comparison of DC current simulation results

本文仅建立了交流系统不对称情况下含换流器、直流线路和控制系统的完整的 HVDC 动态相量模型, 未建立交流系统交流滤波器、无功补偿装置以及换流变压器的动态相量模型, 而是采集 PSCAD 仿真模型中直流系统整流侧和逆变侧两侧交流系统 abc 三相电压值作为本文建立的 HVDC

系统动态相量模型的输入来验证 HVDC 动态相量模型的有效性。

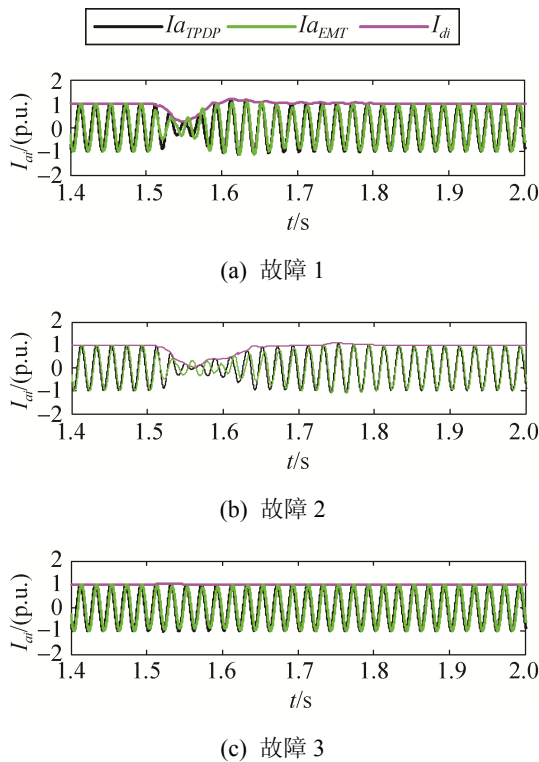


图 8 交流电流仿真结果对比  
Fig. 8 Comparison of AC current simulation results

图 6 和图 7 的仿真结果可以看出, HVDC 系统三相动态相量模型能较好地跟踪交流系统故障下 HVDC 系统的动态过程, 且比文献[7]建立的换流器动态相量模型仿真结果更接近于详细的电磁暂态模型仿真结果。因未建立交流系统模型, 因此模型逆变侧交流电流存在一定误差。

### 4.3 仿真误差分析

本文使用残差相似度方法分析了 HVDC 系统三相动态相量模型仿真结果和电磁暂态模型仿真结果之间的误差。残差相似度计算公式为:

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \frac{|y_i|}{\sum_{i=1}^N |y_i|} \\ x_i &= 1 - \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\max(|y_i|, |\hat{y}_i|)} \\ \varphi &= \sum_{i=1}^N \gamma_i x_i \end{aligned} \quad (25)$$

式中:  $y$  和  $\hat{y}$  分别为 HVDC 系统电磁暂态模型仿真结果和三相动态相量模型仿真结果,  $x$  为相似度,  $\varphi$  为残差相似度指标。

本文只建立了 HVDC 系统的动态相量模型, 在此只分析直流电压和直流电流的残差相似度, 残差相似度对比对象是本文建立的模型得到的直流电压、电流的时域值和电磁暂态模型得到的直流电压电流的时域值。

故障 1、故障 2 和故障 3 在  $t=1.4$  s 到  $t=2$  s 之间直流电压和直流电流的残差相似度分别如表 2、表 3 和表 4 所示。其中  $\Phi_1$  是使用本文所建模型与电磁暂态模型之间的残差相似度,  $\Phi_2$  是使用文献[7]所建模型与电磁暂态模型之间的残差相似度。

表 2 故障 1 残差相似度  
Tab. 2 Residual similarity in fault 1 %

类型	$V_{dr}$	$V_{di}$	$I_{dr}$	$I_{di}$
$\Phi_1$	95.94	95.81	93.33	96.03
$\Phi_2$	76.60	77.41	75.56	73.24

表 3 故障 2 残差相似度  
Tab. 3 Residual similarity in fault 2 %

类型	$V_{dr}$	$V_{di}$	$I_{dr}$	$I_{di}$
$\Phi_1$	93.95	94.35	90.2	94.99
$\Phi_2$	73.89	72.93	74.39	77.29

表 4 故障 3 残差相似度  
Tab. 4 Residual similarity in fault 3 %

类型	$V_{dr}$	$V_{di}$	$I_{dr}$	$I_{di}$
$\Phi_1$	98.84	98.82	99.56	99.29
$\Phi_2$	70.61	71.47	69.37	69.48

一般认为残差相似度大于 80% 时, 模型仿真能满足仿真误差要求<sup>[16]</sup>。本文所建的 HVDC 三相动态相量模型的直流电压和直流电流的残差相似度均大于 90%, 能较好满足仿真误差要求。

## 5 结论

为完善 HVDC 系统的动态模型, 本文修正了使用动态相量理论建立的适用于交流系统不对称故障时的换流器三相动态相量模型, 并建立了直流线路和控制系统的三相动态相量模型, 实现了完整

的 HVDC 系统三相动态相量模型,并实现了 HVDC 系统三相动态相量模型的仿真过程。PSCAD/EMTDC 中电磁暂态模型仿真结果和 Matlab 中 HVDC 系统三相动态相量模型仿真结果的对比分析验证了所提三相动态相量模型的正确性和有效性。

### 参考文献:

- [1] 姚良忠, 吴婧, 王志兵, 等. 未来高压直流电网发展形态分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020. (Yao Liangzhong, Wu jing, Wang zhibing, et al. Pattern Analysis of Future HVDC Grid Development [J]. Processing of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.)
- [2] Haojun Zhu, Zexiang Cai, Ani M Gole, et al. Improved Coherency-Based Wide-Band Equivalents for Real-Time Digital Simulators [J]. IEEE Transaction on Power System (S0885-8950), 2011, 26(3): 1410-1417.
- [3] 宋新立, 吴小辰, 刘文焯, 等. PSD-BPA 暂态稳定程序中的新直流输电准稳态模型 [J]. 电网技术, 2010, 34(1): 62-67. (Song Xinli, Wu Xiaochen, Liu Wenzhuo, et al. New Quasi-Steady-State HVDC Models for PSD-BPA Power System Transient Stability Simulation Program [J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 62-67.)
- [4] Sanders S R, Noworolshi J M, Liu X Z, et al. Generalized averaging method for power conversion circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 1991, 6(2): 251-259.
- [5] 戚庆茹, 焦连伟, 严正, 等. 高压直流输电动态相量建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 28-32. (QI Qingru, Jiao LianWei, Yan Zheng, et al. Modeling and Simulation of HVDC with Dynamic phasors [J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(12): 28-32.)
- [6] Haojun Zhu, Zexiang Cai, Haoming Liu, et al. Hybrid-model transient stability simulation using dynamic phasors based HVDC system model [J]. Electric Power System Research (S0378-7796), 2006, 76(6/7): 582-591.
- [7] Chongru Liu, Anjan Bose, Pengfei Tian. Modeling and Analysis of HVDC Converter Three-Phase Dynamic Phasor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery (S0885-8977), 2014, 29(1): 3-12.
- [8] 王钢, 李志铿, 李海峰, 等. 交直流系统的换流器动态相量模型 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 59-64. (Wang Gang, Li Zhikeng, Li Haifeng, et al. Dynamic Phasor Model of the Converter of the AC/DC system [J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(1): 59-64.)
- [9] 曾正, 赵荣祥, 杨欢. 含逆变器的微电网动态相量模型 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 65-71. (Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Yang Huan. Dynamic Phasors Model of Micro-grid with Grid-connected Inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 65-71.)
- [10] 胡伟, 孙建军, 查晓明, 等. 基于动态相量法的逆变型分布式电源微电网建模与仿真 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 14-18. (Hu Wei, Sun Jianjun, Zha Xiaoming, et al. Modeling and Simulation of Microgrid Including Inverter-interfaced Distributed Resources Based on Dynamic Phasors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 14-18.)
- [11] Gu Herong, An Shaocong, Zhao Wei, et al. Modeling and simulation of single phase inverter with dynamic phasor [J]. Advanced Materials Research (S1662-8985), 2012, 354/355: 1381-1385.
- [12] Nagarajan A, Ayyanar R. Dynamic phasor model of single-phase inverter for analysis and simulation of large power distribution system [C]// 4th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Arkansas, USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [13] SR Deore, PB Darji, AM Kulkarni. Dynamic phasor modeling of modular multi-level converters [C]// 7th International Conference on Industrial and Information Systems, Chennai, India. USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [14] Lihua Hu, Robert Yacamini. Harmonic transfer through converters and HVDC links [J]. IEEE Transaction on Power Electronic (S0885-8993), 1992, 7(3): 514-525.
- [15] 许德操, 韩民晓, 丁辉, 等. 基于 PSASP 的直流系统用户自定义建模 [J]. 电力系统及其自动化, 2007, 31(6): 71-76. (Xu Decao, Han Minxiao, Ding Hui, et al. Modeling of HVDC Based on the User-defined Model of PSASP [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 71-76.)
- [16] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 电力系统仿真可信度评估方法的研究 [J]. 中国电机工程学报. 2010, 30(19): 51-57. (Jia Xudong, Li Gengyin, Zhao Chengyong, et al. Study of the Credibility Evaluation Method for the Power System Simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 51-57.)