

# 适用于对称故障仿真的特高压柔性直流换流站 动态相量建模

郑安然<sup>1</sup>, 郭春义<sup>2</sup>, 伍子东<sup>1</sup>, 田旦瑜<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司 东莞供电局, 广东 东莞 523000;

2. 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:**随着多项特高压柔性直流工程投运,建立高效而准确的模型用以研究特高压柔性直流换流站运行特性很有必要。为此提出了基于模块化多电平换流器的特高压柔性直流换流站的动态相量解析模型,该模型能准确描述稳态及发生对称故障时特高压柔性直流换流站的动态特性。首先通过研究高低端换流器交直流侧的相互作用关系,重新建立了多换流器与交直流系统的接口模型。然后结合考虑内部谐波特性的换流器模型,建立了特高压柔性直流换流站的动态相量解析模型。通过对已建立动态相量模型中交流侧状态空间方程的修正,进一步扩展了其在交流系统发生对称故障下的适用性。最后基于PSCAD/EMTDC中的电磁暂态仿真模型,验证了所建模型在稳态和故障下的正确性和高效性。

**关键词:**特高压柔性直流换流站;高低端换流器;交直流侧耦合;动态相量解析模型

**中图分类号:**TM 721.1

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202207003

## 0 引言

自柔性直流输电技术诞生以来,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)以其波形质量高、器件承受电压变化率低等优势在输电领域中占据了重要的地位<sup>[1-2]</sup>。随着直流输电工程向着高电压、大容量的方向发展,特高压柔性直流(voltage source converter ultra-high voltage direct current, VSC-UHVDC)换流技术也得到了学术界和工程界的广泛关注。由于在特高压场景下柔性直流换流站的单台MMC无法承受特高压,为了匹配电压需将2台MMC串联。正在建设中的特高压混合多端直流输电系统 $\pm 800$  kV 乌东德工程中2座逆变站均采用特高压柔性直流换流站。与常规特高压直流换流站相类似,该工程中的特高压柔性直流换流站为对称双极结构,且由2台400 kV的MMC串联组成<sup>[3-4]</sup>。

由于特高压柔性直流换流站由2台MMC串联组成且每台MMC内有大量子模块,这直接影响了含特高压柔性直流换流站的交直流混联大电网的故障态仿真效率。尤其是在包含多台MMC的交直流混联电网的系统特性研究场景中,需要在多种运行工况、不同故障位置、不同故障严重程度下提前进行大量的重复性仿真,从而对系统进行短路电流分析、继电保护配置、安全稳定分析等。虽然已有MMC高效模型<sup>[5-8]</sup>可以方便扩展至特高压串联MMC场合,但当MMC数量增加且需要重复性仿真时,该模型的仿真效率也在一定程度上受到了限制。

针对柔性直流系统的建模已有很多研究成果。

文献[5-8]基于戴维南等效和受控源等效提出了MMC的高效建模方法,在保证可以描述子模块暂态特性的同时大幅提升了仿真效率,然而含有多台MMC的大电网机电暂态模型的仿真效率仍受到限制。文献[9-10]基于平均开关函数法建立了MMC的解析数学模型,推导了2次环流、子模块电容电压波动的解析表达式,然而该模型不能描述发生交流故障时的动态过程。文献[11-12]建立了平均值模型来描述MMC,然而平均值模型未考虑2次环流抑制和3次谐波,忽略了MMC的内部谐波特性。MMC的机电暂态模型由于在平均值模型的基础上作了进一步简化,仿真效率进一步提高<sup>[13-14]</sup>,但无法反映MMC内部的谐波特性。内部谐波会直接影响MMC的稳定性,是实际工程和研究中重点关注的内容之一,文献[11-14]中的平均值模型和机电暂态模型无法适用于关注内部谐波特性的研究,模型的适用度受限。

为了反映MMC的内部谐波特性,在保证模型精度的同时兼顾仿真速度,文献[15-17]提出了基于动态相量的MMC模型,该模型考虑了MMC内部的谐波特性,如子模块电容电压和桥臂电流的谐波成分,然而该模型针对含单台MMC的直流系统。单台MMC的交直流侧出口直接与交直流系统相连,因此MMC与交直流系统的接口模型较为简单。而对于特高压柔性直流换流站中的高低端换流器,由于高低端换流器直流侧串联、交流侧并联的结构特征,MMC与交直流系统的接口模型需要考虑其耦合关系重新建立,与文献[15-17]中换流器与交直流系统接口的建模方式存在明显不同。

本文提出了基于MMC的特高压柔性直流换流站动态相量解析模型,能准确描述交流系统对称运

行及三相对称故障下特高压柔性直流换流站的动态过程。该模型不仅考虑了高低端换流器的内部动态特性,而且准确描述了交直流侧的相互作用关系;通过对已建立动态相量模型中交流侧状态空间方程的修正,进一步扩展了其在交流系统发生三相对称故障下的适用性。最后,在特高压柔性直流输电系统直流电流阶跃变化和三相对称交流故障情况下,通过将解析计算结果与仿真结果进行对比,验证了所建模型的正确性和准确度,对比结果表明所建模型具有较高的仿真效率。

## 1 特高压柔性直流换流站的动态相量解析模型

### 1.1 系统结构及建模思路

特高压柔性直流输电系统以及特高压混合直流输电系统均是以特高压柔性直流换流站作为重要组成单元,本文重点研究了特高压柔性直流换流站的动态相量模型。

特高压柔性直流换流站采用对称双极接线,且每极2台MMC(即高低端换流器)串联连接。由于系统采用对称双极结构,本文以正极为例进行研究,其等效电路如图1所示。图中: $u_s$ 为交流系统等值电压源; $u_t$ 为系统交流母线电压; $R_s$ 、 $L_s$ 分别为交流系统等值电阻、电感; $i_s$ 为流过其所在支路的电流; $R_T$ 、 $L_T$ 分别为换流变压器的等值电阻、电感; $u_{v,i}$ 、 $i_{s,i}$ (下标*i*=h时表示高端换流器,*i*=l时表示低端换流器,后同)分别为高低端换流器交流侧电压、电流; $U_{dc,i}$ 、 $I_{dc,i}$ 分别为高低端换流器直流侧电压、电流; $U_{dc,M}$ 为直流系统的电压。

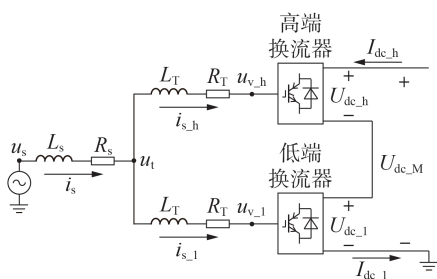


图1 特高压柔性直流换流站等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of VSC-UHVDC converter station

由图1可知:交流系统的电流 $i_s$ 为高低端换流器交流侧出口电流 $i_{s,h}$ 与 $i_{s,l}$ 之和,高低端换流器交流侧存在并联关系;直流系统的电压 $U_{dc,M}$ 为高低端换流器直流侧出口电压 $U_{dc,h}$ 与 $U_{dc,l}$ 之和,高低端换流器直流侧存在串联关系。与国外已有交直流系统建模方法相比<sup>[18-19]</sup>,虽然高低端换流器内部的建模方法一致,但增加了换流器对外部的接口建模。由于高低端换流器直流侧串联、交流侧并联的结构特征,高

低端换流器之间、交直流之间具有很强的耦合关系,建模时并不能直接采用现有模型中换流器与交直流系统接口模型,而是需要根据换流器相关耦合特性对交直流系统接口进行重新分析和建模。高低端换流器与交直流系统接口模型的重新建模需要考虑以下3点:①由于高低端换流器在直流侧的串联关系,高低端换流器的直流电压不与直流侧线路电容电压相等,流经高端换流器的直流电流 $I_{dc}$ 同时也流经低端换流器的桥臂电抗器,故在建模时应同时考虑高低端换流器桥臂电抗对 $I_{dc}$ 动态过程的影响,即将 $I_{dc}$ 定义为高低端换流器桥臂电抗的共同状态变量,将高低端换流器直流侧出口电压之和作为与外部直流系统联接的端口电压;②由于交流侧高低端换流器的并联关系,交流系统与高低端换流器交流母线电压 $u_t$ 不能直接通过单台换流器交流侧电流来获得,必须结合交流侧的并联关系,将高低端换流器交流侧电流联合起来求解;③高低端换流器在交流侧并联,且各自以自身锁相环(phase locked loop, PLL)锁相,故在交流侧需进行不同坐标系之间的转换。

根据以上分析,本文基于高低端换流器交直流侧的耦合关系确立了建模思路,将特高压柔性直流换流站中串联的高低端换流器分别独立建模,再基于高低端换流器之间的电路结构建立接口模型,最终形成完整的特高压柔性直流换流站的动态模型。

### 1.2 高低端换流器建模

#### 1.2.1 主电路模型

高低端换流器三相对称运行时,以单相为例,单个桥臂的平均开关函数模型如式(1)、(2)所示<sup>[16]</sup>。

$$S_{k,i} i_{k,i} = C \frac{du_{ck,i}}{dt} \quad (1)$$

$$u_{armk,i} = NS_{k,i} u_{ck,i} \quad (2)$$

式中: $i_{k,i}$ 和 $u_{armk,i}$ ( $k=p$ 时表示上桥臂, $k=n$ 时表示下桥臂,后同)分别为高低端换流器单相桥臂的电流和电压; $u_{ck,i}$ 为桥臂子模块的电容电压(忽略桥臂上各个子模块电容电压之间的差异); $S_{k,i}$ 为高低端换流器单相桥臂的平均开关函数; $C$ 为子模块电容; $N$ 为子模块数量。

稳态运行时,高低端换流器单相上、下桥臂的平均开关函数可表示为:

$$\begin{cases} S_{p,i} = \frac{\frac{U_{den}}{2} - M_i \frac{U_{den}}{2} \sin(\omega t + \alpha_i) + U_{cir,i} \sin(2\omega t + \varphi_i)}{U_{den}} \\ S_{n,i} = \frac{\frac{U_{den}}{2} + M_i \frac{U_{den}}{2} \sin(\omega t + \alpha_i) + U_{cir,i} \sin(2\omega t + \varphi_i)}{U_{den}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\frac{U_{den}}{2}$ 为直流项, $U_{den}$ 为直流电压额定值; $\frac{1}{2}M_i \times U_{den} \sin(\omega t + \alpha_i)$ 为由高低端换流器中电流矢量控制器生成的基频参考电压,为基频交流项, $M_i$ 和 $\alpha_i$ 分别为高低端换流器调制比和基频参考电压的相角, $\omega$ 为

稳态运行时, 高低端换流器桥臂电流由直流电流、交流电流与 2 倍频环流组成 (此处只考虑 2 倍频环流, 忽略 4 阶及以上分量)<sup>[10]</sup>, 单相上、下桥臂电流可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\left\{ \begin{aligned} i_{p,i} &= \frac{1}{3} I_{dc} - \frac{1}{2} I_{s,i} \sin(\omega t + \beta_{1,i}) + I_{cir,i} \sin(2\omega t + \beta_{2,i}) \\ i_{n,i} &= \frac{1}{3} I_{dc} + \frac{1}{2} I_{s,i} \sin(\omega t + \beta_{1,i}) + I_{cir,i} \sin(2\omega t + \beta_{2,i}) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

下面的推导以 MMC 单相上桥臂为例展开, 下桥臂同理。子模块电容电压  $u_{cm}$  可表示为<sup>[16]</sup>:

$$u_{cp\_i} = u_{c\_dc\_i} + u_{c\_1\_i} \sin(\omega t + \theta_{1\_i}) + u_{c\_2\_i} \sin(2\omega t + \theta_{2\_i}) + u_{c\_3\_i} \sin(3\omega t + \theta_{3\_i}) \quad (5)$$

1)子模块电容电压的动态描述。将式(3)和式(4)代入式(1),可得子模块电容电压直流分量、基频交流分量、2倍频交流分量和3倍频交流分量的动态方程<sup>[16]</sup>。

最后将上述子模块电容电压及桥臂电流的动态方程组进行 $dq$ 变换,将上述方程与 $dq$ 变换矩阵相乘,把对称的三相交流分量变换为 $dq$ 旋转坐标系下的直流分量,从而得到高低端换流器主电路部分的动态相量模型,可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\dot{X}_{\text{mmc } i} = f_{\text{mmc } i}(X_{\text{mmc } i}, U_{\text{mmc } i}) \quad (6)$$

式中:  $f_{\text{mmc}_i}$  为高低端换流器主电路的动态相量模型;  $X_{\text{mmc}_i}$  为高低端换流器主电路部分的状态变量,  $X_{\text{mmc}_i} = [U_{e_{d\_i}}, U_{e_{l_{d\_i}}}, U_{e_{l_{q\_i}}}, U_{e_{2d\_i}}, U_{e_{2q\_i}}, U_{e_{3x\_i}}, U_{e_{3y\_i}}, I_{d_{d\_i}}, I_{d_{l_{d\_i}}}, I_{sq_{d\_i}}, I_{cir_{d\_i}}, I_{cir_{q\_i}}]^T$  (下标  $d, q$  分别表示相应电气量的  $d, q$  轴分量, 下标  $x, y$  分别表示相应电气量的  $x, y$  轴分量);  $U_{\text{mmc}_i}$  为高低端换流器主电路部分的输入变量,  $U_{\text{mmc}_i} = [U_{l_{d\_i}}, U_{l_{q\_i}}, U_{d_{d\_i}}, \omega_{d\_i}, U_{vd_{d\_i}}, U_{vq_{d\_i}}, U_{cir_{d\_i}}, U_{cir_{q\_i}}]^T$ , 其中输入变量  $U_{cir_{d\_i}}, U_{cir_{q\_i}}, U_{vd_{d\_i}}, U_{vq_{d\_i}}$  和  $\omega_{d\_i}$  提供了控制器对高低端换流器主电路的接口, 分别对应环流抑制控制器输出量  $U_{cir_{d\_i}}, U_{cir_{q\_i}}$ , 电流矢量控制器输出量  $U_{vd_{d\_i}}, U_{vq_{d\_i}}$  和 PLL 输出量  $\omega_{d\_i}, U_{l_{d\_i}}$  与  $U_{l_{q\_i}}$  提供了交流系统对高低端换流器主电路的接口电压,  $U_{d_{d\_i}}$  提供了直流侧对高低端换流器主电路的接口电压。

### 1.2.2 控制系统模型

MMC 的控制系统主要包括 PLL、电流矢量控制与环流抑制控制 3 个部分。本文基于文献[16]建立了 PLL 以及环流抑制控制的动态相量模型, PLL 引入状态变量  $U_{\text{qmpLL}i}, x_{5-i}, x_{\text{pll}i}$ , 环流抑制控制引入状态变量  $f_{1-i}, f_{2-i}$  [16]。电流矢量控制器的结构示意图如图 2 所示。

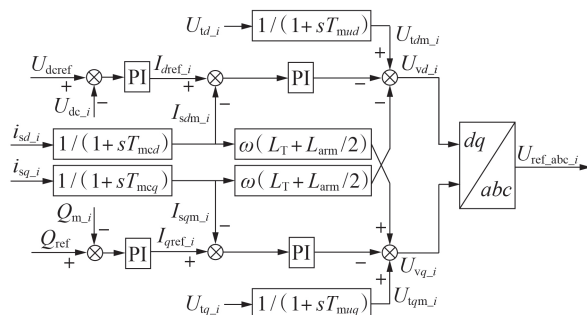


图2 电流矢量控制框图

Fig.2 Block diagram of current vector control

电流矢量控制内外环部分的状态空间方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_{1-i} = I_{dref-i} - I_{sdm-i} \\ \dot{x}_{2-i} = I_{qref-i} - I_{sqm-i} \\ \dot{x}_{3-i} = U_{dref} - U_{dc-i} \\ \dot{x}_{4-i} = Q_{ref} - Q_{m-i} \end{array} \right. \quad (7)$$

式中:  $x_{1_i} - x_{4_i}$  分别为 4 个比例积分 (proportional integral, PI) 环节误差信号对时间的积分;  $U_{dref}$ 、 $Q_{ref}$ 、 $Q_{m_i}$  分别为定直流电压指令值、定无功功率指令值、无功功率实际值;  $I_{sdm_i}$ 、 $I_{sqm_i}$  分别为经过一阶滤波得到的交流电流  $d$ 、 $q$  轴分量。电流矢量控制的外环为内环提供电流参考值  $I_{dref_i}$ 、 $I_{qref_i}$ , 进而由内环生成换流器桥臂参考电压  $U_{vd_i}$ 、 $U_{vq_i}$ , 表达式如式 (8) 所示, 即提供了电流矢量控制器对 MMC 主电路的接口。

$$\begin{cases} I_{dref\_i} = K_{p1\_i} \dot{x}_{3\_i} + K_{i1\_i} x_{3\_i} \\ I_{qref\_i} = K_{p2\_i} \dot{x}_{4\_i} + K_{i2\_i} x_{4\_i} \\ U_{vd\_i} = U_{tdm\_i} - \omega L_{eq\_i} I_{sqm\_i} - \left( K_{p3\_i} \dot{x}_{1\_i} + K_{i3\_i} x_{1\_i} \right) \\ U_{vq\_i} = U_{tqm\_i} + \omega L_{eq\_i} I_{sdm\_i} - \left( K_{p4\_i} \dot{x}_{2\_i} + K_{i4\_i} x_{2\_i} \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $L_{\text{eq},i} = L_{\text{T}} + L_{\text{arm}}/2$ ,  $L_{\text{arm}}$  为桥臂电感;  $K_{\text{p}1,i} - K_{\text{p}4,i}$ 、 $K_{\text{il},i} - K_{\text{il},i}$  分别为电流矢量控制的比例、积分系数;  $U_{\text{ldm},i}$ 、 $U_{\text{lgm},i}$  分别为经过一阶滤波得到的交流母线电压  $d$ 、 $q$  轴分量。电流矢量控制中测量环节是基于一阶惯性环节, 其状态空间方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{sdm\_i} = (I_{sd\_i} - I_{sdm\_i}) / T_{mcd} \\ \dot{I}_{sqm\_i} = (I_{sq\_i} - I_{sqm\_i}) / T_{mcq} \\ \dot{U}_{ldm\_i} = (U_{ld\_i} - U_{ldm\_i}) / T_{mud} \\ \dot{U}_{lqm\_i} = (U_{lq\_i} - U_{lqm\_i}) / T_{muq} \end{array} \right. \quad (9)$$

式中:  $T_{mcd}$ 、 $T_{mcq}$  为电流量的测量常数;  $T_{mud}$ 、 $T_{muq}$  为电压

量的测量常数。

### 1.3 高低端换流器交流侧建模

高低端换流器主电路建模部分包括了交流电流模型,其状态空间方程如下:

$$\begin{cases} L_{eq,i} \frac{dI_{sd,i}}{dt} = U_{td,i} + U_{arm,ac1d,i} - R_{eq,i} I_{sd,i} - \omega L_{eq,i} I_{sq,i} \\ L_{eq,i} \frac{dI_{sq,i}}{dt} = U_{tq,i} + U_{arm,ac1q,i} - R_{eq,i} I_{sq,i} + \omega L_{eq,i} I_{sd,i} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $U_{arm,ac1d,i}$ 、 $U_{arm,ac1q,i}$  分别为桥臂电压基频交流分量的  $d$ 、 $q$  轴分量,已通过高低端换流器主电路建模求得;  $R_{eq,i} = R_T + R_{arm}/2$ ,  $R_{arm}$  为桥臂电阻;  $U_{td,i}$ 、 $U_{tq,i}$  分别为交流母线电压的  $d$ 、 $q$  轴分量,高低端换流器主电路模型中缺少其计算公式,需要交流系统提供  $u_{ti}$  的计算公式,再通过派克变换作为对高低端换流器交流侧的接口。高低端换流器的交流侧示意图见图3。

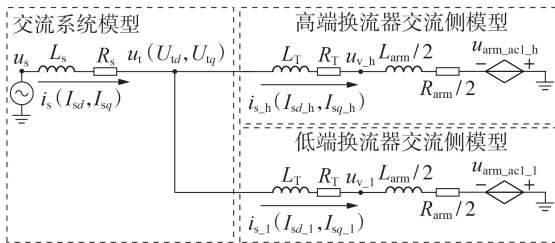


图3 高低端换流器的交流侧示意图

Fig.3 Schematic diagram of high and low terminal converters at AC side

通过高低端换流器交流侧的并联关系可得交流系统的模型如下:

$$u_t = u_s - (i_{s,h} + i_{s,l}) R_s - L_s \frac{d(i_{s,h} + i_{s,l})}{dt} \quad (11)$$

由于高低端换流器均以本换流器内部的 PLL<sub>h</sub>、PLL<sub>l</sub> 输出作为参考频率和相角,因此,在建立交流系统的模型时,需要对不同  $dq$  坐标系下的电压与电流进行变换。令高端换流器 PLL<sub>h</sub> 的  $dq$  坐标系为交流系统的参考坐标系,将式(11)变换到高端换流器 PLL<sub>h</sub> 的  $dq$  坐标系下,如式(12)所示。

$$\begin{cases} U_{td,h} = U_{sd} - (I_{sd,h} + I_{sd,ltoh}) R_s - \\ L_s \frac{d(I_{sd,h} + I_{sd,ltoh})}{dt} - \omega L_s (I_{sq,h} + I_{sq,ltoh}) \\ U_{tq,h} = U_{sq} - (I_{sq,h} + I_{sq,ltoh}) R_s - \\ L_s \frac{d(I_{sq,h} + I_{sq,ltoh})}{dt} + \omega L_s (I_{sd,h} + I_{sd,ltoh}) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $I_{sd,h}$ 、 $I_{sq,h}$  微分项的表达式如式(10)所示;  $I_{sd,ltoh}$ 、 $I_{sq,ltoh}$  分别为低端换流器电流  $d$ 、 $q$  轴分量  $I_{sd,l}$ 、 $I_{sq,l}$  变换至高端换流器  $dq$  坐标系下的电流,其变换关系见式(13)。

$$\begin{cases} I_{sd,ltoh} = I_{sd,l} \cos(\theta_l - \theta_h) + I_{sq,l} \sin(\theta_l - \theta_h) \\ I_{sq,ltoh} = I_{sq,l} \cos(\theta_l - \theta_h) - I_{sd,l} \sin(\theta_l - \theta_h) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\theta_i$  为 PLL<sub>i</sub> 输出的相角。  $I_{sd,ltoh}$ 、 $I_{sq,ltoh}$  微分项的表达式可对式(13)两端求导得到,如式(14)所示。

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd,ltoh}}{dt} = \frac{dI_{sd,l}}{dt} \cos(\theta_l - \theta_h) - I_{sd,l} \sin(\theta_l - \theta_h) \left( \frac{d\theta_l}{dt} - \frac{d\theta_h}{dt} \right) + \\ \frac{dI_{sq,l}}{dt} \sin(\theta_l - \theta_h) + I_{sq,l} \cos(\theta_l - \theta_h) \left( \frac{d\theta_l}{dt} - \frac{d\theta_h}{dt} \right) \\ \frac{dI_{sq,ltoh}}{dt} = \frac{dI_{sq,l}}{dt} \cos(\theta_l - \theta_h) - I_{sq,l} \sin(\theta_l - \theta_h) \left( \frac{d\theta_l}{dt} - \frac{d\theta_h}{dt} \right) - \\ \frac{dI_{sd,l}}{dt} \sin(\theta_l - \theta_h) - I_{sd,l} \cos(\theta_l - \theta_h) \left( \frac{d\theta_l}{dt} - \frac{d\theta_h}{dt} \right) \end{cases} \quad (14)$$

$\theta_h$ 、 $\theta_l$  微分项的表达式可由 PLL 的状态空间方程得到。将式(10)、(13)、(14)代入式(12),即可得到  $u_{th}$  的动态方程,作为交流系统对高端换流器交流侧的接口,具体接口方程见附录 A 式(A1)、(A2)。

此外,对于低端换流器,需要将交流母线电压  $u_t$  在高端换流器  $dq$  坐标系下电压分量  $U_{td,h}$ 、 $U_{tq,h}$  变换至低端换流器对应  $dq$  坐标系后才可用于低端换流器交流侧模型以及控制系统中,变换关系如下:

$$\begin{cases} U_{td,l} = U_{td,h} \cos(\theta_l - \theta_h) - U_{tq,h} \sin(\theta_l - \theta_h) \\ U_{tq,l} = U_{tq,h} \cos(\theta_l - \theta_h) + U_{td,h} \sin(\theta_l - \theta_h) \end{cases} \quad (15)$$

将  $u_{th}$  的动态方程代入式(15)则可得到  $u_{tl}$  的动态方程,作为交流系统对低端换流器交流侧的接口,具体接口方程见附录 A 式(A3)、(A4)。

### 1.4 高低端换流器直流侧建模

高低端换流器主电路建模过程中均建立了直流电流模型,其状态空间方程如下:

$$\frac{2}{3} L_{arm} \frac{dI_{dc,i}}{dt} = U_{dc,i} - 2u_{arm,dc,i} - \frac{2}{3} R_{arm} I_{dc,i} \quad (16)$$

式中:  $u_{arm,dc,i}$  为桥臂电压直流分量,已通过高低端换流器主电路建模求得;  $U_{dc,i}$  为高低端换流器直流侧出口电压,高低端换流器主电路模型中缺少其计算公式,需要直流系统提供  $U_{dc,i}$  的计算公式作为对高低端换流器直流侧的接口。

由于在主电路建模部分,高低端换流器独立建模,均建立了直流电流的动态相量方程,而在特高压柔性直流换流站中高低端换流器直流侧存在串联关系,两者的直流电流相等,因此需要对直流电流模型进行修正。高低端换流器的直流侧示意图见图4。

令高端换流器电流  $I_{dc,h}$  为状态变量,换流站直流侧的模型如下:

$$U_{dc,h} = U_{dc,M} - U_{dc,l} \quad (17)$$

将式(16)整理成高低端换流器直流侧出口电压  $U_{dc,h}$ 、 $U_{dc,l}$  的方程并代入式(17),由于  $I_{dc,h} = I_{dc,l}$ ,整理

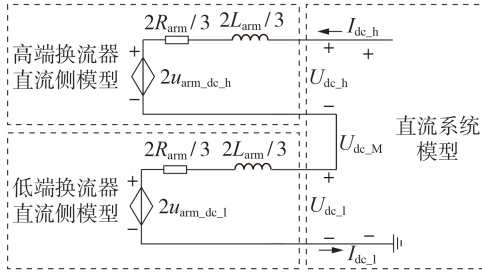


图4 高低端换流器的直流侧示意图

Fig.4 Schematic diagram of high and low terminal converters at DC side

后可得直流电流的动态方程为:

$$\frac{4}{3} L_{\text{arm}} \frac{dI_{\text{dc}_h}}{dt} = U_{\text{dc}_M} - 2u_{\text{arm\_dc}_h} - 2u_{\text{arm\_dc}_l} - \frac{4}{3} R_{\text{arm}} I_{\text{dc}_h} \quad (18)$$

以式(18)替换式(16)所示高低端换流器主电路建模部分的直流电流模型,即可完成对高低端换流器主电路模型中直流电流模型的修正。

### 1.5 动态相量解析模型

基于上述状态空间模型可得到用于研究准稳态时系统响应的49阶动态相量模型,如式(19)所示。

$$\dot{X} = f(X, U) \quad (19)$$

式中:  $f$  为高低端换流器主电路的动态相量函数; 状态变量  $X = [u_{\text{dc}_h}, u_{\text{dc}_l}, u_{\text{c}_1q_h}, u_{\text{c}_2d_h}, u_{\text{c}_2q_h}, u_{\text{c}_3x_h}, u_{\text{c}_3y_h}, I_{\text{sd}_h}, I_{\text{sq}_h}, I_{\text{cir}_h}, I_{\text{ciq}_h}, I_{\text{dc}_h}, U_{\text{tdm}_h}, U_{\text{tqm}_h}, U_{\text{tqmpl}_h}, I_{\text{sdm}_h}, I_{\text{sqm}_h}, x_{1_h}, x_{2_h}, x_{3_h}, x_{4_h}, f_{1_h}, f_{2_h}, x_{5_h}, x_{\text{pll}_h}, u_{\text{dc}_l}, u_{\text{c}_1q_l}, u_{\text{c}_2d_l}, u_{\text{c}_2q_l}, u_{\text{c}_3x_l}, u_{\text{c}_3y_l}, I_{\text{sd}_l}, I_{\text{sq}_l}, I_{\text{cir}_l}, I_{\text{ciq}_l}, U_{\text{tdm}_l}, U_{\text{tqm}_l}, U_{\text{tqmpl}_l}, I_{\text{sdm}_l}, I_{\text{sqm}_l}, x_{1_l}, x_{2_l}, x_{3_l}, x_{4_l}, f_{1_l}, f_{2_l}, x_{5_l}, x_{\text{pll}_l}]^T$ ; 输入变量  $U$  为电流矢量控制的指令值及换流站直流电压,  $U = [U_{\text{dref}_h}, Q_{\text{ref}_h}, U_{\text{dref}_l}, Q_{\text{ref}_l}, U_{\text{dc}_M}]^T$ 。

为扩展上述动态相量模型在交流故障发生时的适用性,下文对所建动态相量模型进行进一步修正。

## 2 对称三相接地短路故障下的动态相量解析模型

本节对特高压柔性直流换流站在交流侧发生对称三相接地短路故障的情况进行研究,建立特高压柔性直流换流站的暂态模型。需要注意的是:由于换流站模型是基于三相对称的前提建立的,故本文所修正的模型也仅适用于研究对称故障下的系统暂态特性;不对称故障下系统的动态相量模型需要对MMC进行重新建模,故不在本文的研究范围内。

### 2.1 交流母线发生感性与阻性对称三相接地短路故障时的特高压柔性直流换流站模型修正

交流母线发生感性与阻性对称三相接地短路故障时的特高压柔性直流换流站模型的高低端换流器主电路、控制系统以及直流侧模型都与前文模型一致,仅在交流侧建模部分存在区别,下文对动态相量模型的交流侧部分进行修正。在高低端换流器的交

流侧母线加入电感与电阻接地支路,示意图见图5。

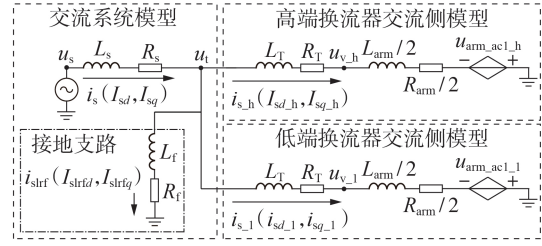


图5 感性与阻性对称三相接地短路故障时高低端换流器的交流侧示意图

Fig.5 Schematic diagram of high and low terminal converters at AC side under inductive and resistive three-phase symmetrical earthing fault

令电感与电阻接地支路电流的  $d, q$  轴分量  $I_{\text{slrfd}}, I_{\text{slrfq}}$  为状态变量,其动态方程为:

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_{\text{slrfd}}}{dt} = U_{\text{td}_h} - R_f I_{\text{slrfd}} - \omega L_f I_{\text{slrfq}} \\ L_f \frac{dI_{\text{slrfq}}}{dt} = U_{\text{tq}_h} - R_f I_{\text{slrfq}} + \omega L_f I_{\text{slrfd}} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $L_f, R_f$  分别为接地电感与接地电阻。故障情况下,原高低端换流器交流侧并联关系变为高低端换流器交流侧及电感接地支路并联,基于新的并联关系将交流母线电压  $u_t$  的模型修正为:

$$u_t = u_s - (i_{s_h} + i_{s_l} + i_{\text{slrf}}) R_s - L_s \frac{d(i_{s_h} + i_{s_l} + i_{\text{slrf}})}{dt} \quad (21)$$

将式(21)进行  $dq$  变换后再与式(11)同样地进行不同坐标系电气量变换,则可得修正后的  $u_{\text{td}_h}, u_{\text{tq}_h}$  动态方程,作为交流系统对高低端换流器交流侧的接口模型。具体接口方程见附录A式(A5)~(A8)。

结合前文稳态模型中高低端换流器主电路、控制系统以及直流侧模型,可得到用于研究交流母线发生感性与阻性对称三相接地短路故障时换流站响应的51阶动态相量模型,如式(22)所示。

$$\dot{X}_{\text{lrf}} = f_{\text{lrf}}(X_{\text{lrf}}, U_{\text{lrf}}) \quad (22)$$

式中:  $f_{\text{lrf}}$  为交流母线发生感性与阻性混合对称三相接地短路故障时特高压柔性直流换流站的动态相量函数;  $X_{\text{lrf}} = [X, I_{\text{slrfd}}, I_{\text{slrfq}}]^T$  为状态变量,其为式(19)的状态变量以及电感与电阻支路电流的  $d, q$  轴分量;  $U_{\text{lrf}} = [U, L_f, R_f]^T$  为输入变量,其为式(19)的输入变量以及接地电感、电阻值。值得说明的是,当输入变量  $R_f$  取0时,该模型可用于计算交流母线经纯电感三相接地故障的情况。

### 2.2 交流母线发生纯阻性对称三相接地短路故障时的特高压柔性直流换流站模型修正

当交流母线经纯电阻接地时,由于电阻与电感特性不同,无法参照2.1节经电感接地使引入接地支路的电流作为状态变量列写状态空间方程。为解决该问题,引入交流系统电流  $d, q$  轴分量  $I_{\text{sd}}, I_{\text{sq}}$  作为状态变量,其动态方程为:

$$\begin{cases} L_s dI_{sd}/dt = U_{sd} - U_{td,h} - R_s I_{sd} - \omega L_s I_{sq} \\ L_s dI_{sq}/dt = U_{sq} - U_{td,h} - R_s I_{sq} + \omega L_s I_{sd} \end{cases} \quad (23)$$

交流母线电压  $u_i$  可用接地电阻上的压降表示:

$$u_i = R_i i_{\text{strf}} \quad (24)$$

式中:  $i_{\text{strf}}$  为纯电阻接地支路上的电流。由于高低端换流器交流侧及电阻接地支路存在并联关系, 电阻支路上的电流可以用交流系统电流以及高低端换流器交流侧电流表示, 如式(25)所示。

$$i_{\text{strf}} = i_s - i_{s,h} - i_{s,l} \quad (25)$$

将式(25)代入式(24)并进行  $dq$  变换后, 结合式(13)、(15)则可得修正后的  $u_{i,h}$ 、 $u_{i,l}$  动态方程, 作为交流系统对高低端换流器交流侧的接口。具体接口方程见附录A式(A9)、(A10)。

同样, 结合准稳态模型中高低端换流器主电路、控制系统以及直流侧模型可得到用于研究交流母线发生阻性对称三相接地短路故障时换流站响应的51阶动态相量模型, 如式(26)所示。

$$\dot{X}_{\text{rf}} = f_{\text{rf}}(X_{\text{rf}}, U_{\text{rf}}) \quad (26)$$

式中:  $f_{\text{rf}}$  为交流母线发生感性对称三相接地短路故障时特高压柔性直流换流站的动态相量函数; 状态变量  $X_{\text{rf}} = [X, I_{sd}, I_{sq}]^T$  为式(19)的状态变量以及交流系统电流的  $d$ 、 $q$  轴分量; 输入变量  $U_{\text{rf}} = [U, R_i]^T$  为式(19)的输入变量以及接地电阻值。

### 3 特高压柔性直流换流站的动态相量解析模型的验证

本文建立的模型是针对特高压柔性直流换流站的, 对于换流站工作于整流模式和逆变模式都是适用的。为验证所建特高压柔性直流换流站动态相量解析模型的正确性, 下面以特高压柔性直流换流站逆变运行为例建立了特高压柔性直流输电系统, 整流侧无论采用传统直流换流器还是MMC, 均假设整流侧采用定直流电流控制。由于本文重点验证特高压柔性直流换流站的动态相量模型, 故整流侧用电流源模拟, 直流线路采用T型等效模型, 逆变侧特高压柔性直流换流站的高低端换流器均采用定直流电压控制及定无功功率控制。在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建了特高压柔性直流输电系统的详细电磁暂态模型, 对比了特高压柔性直流输电系统在MATLAB中动态相量模型和PSCAD/EMTDC中详细电磁暂态模型在直流电流阶跃变化和交流母线发生对称三相短路接地故障情况下的动态响应, 系统参数见附录B表B1。

#### 3.1 动态相量解析模型的验证

##### 3.1.1 动态相量解析模型的验证

令特高压柔性直流输电系统初始以额定参数运行, 4 s时整流侧直流电流从1 p.u.(3.125 kA)阶跃下降10%至0.9 p.u.(2.8125 kA), 5.5 s时恢复至1 p.u。

MATLAB的动态相量模型结果(dynamic phasor model, DPM)和PSCAD的详细电磁暂态模型仿真结果(electromagnetic transient model, EMT)如图6所示, 图中  $P_h$ 、 $P_l$  分别为高、低端换流器有功功率。由图可知, 在直流电流发生阶跃的工况下, MATLAB中动态相量模型的动态响应和PSCAD中电磁暂态模型的仿真结果基本一致, 验证了本文所建动态相量模型在准稳态下的正确性。

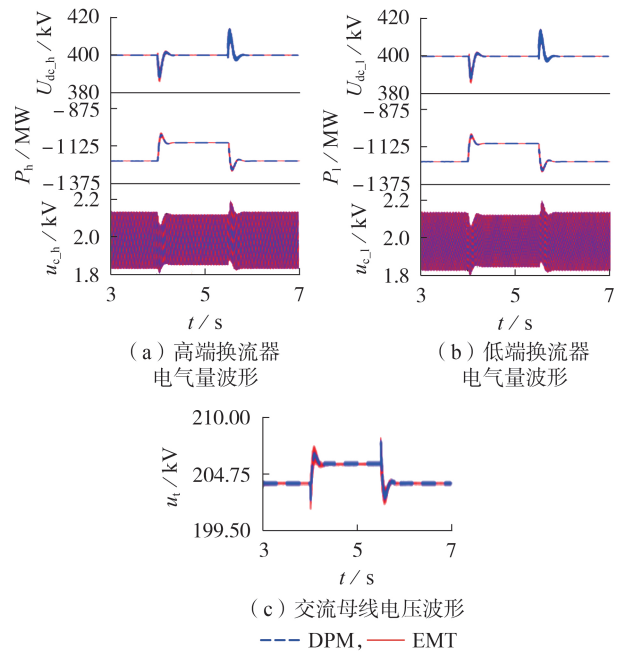


图6 电流阶跃时特高压柔性直流系统的动态特性

Fig.6 Dynamic characteristics of VSC-UHVDC system when current step changes

##### 3.1.2 交流母线发生接地故障下的系统响应

为了验证交流母线发生三相短路接地故障下特高压柔性直流换流站动态相量模型的正确性, 设置如下案例。令特高压柔性直流输电系统初始以额定参数运行, 4.0 s时逆变侧交流母线发生三相经电感短路接地故障, 接地电感值  $L_f = 0.05$  H, 故障持续时间为0.1 s。MATLAB的动态相量模型结果(DPM)和PSCAD的详细电磁暂态模型仿真结果如图7所示。同时, 对感性与阻性故障(接地电感  $L_f = 0.05$  H, 接地电阻  $R_f = 10 \Omega$ , 故障持续0.1 s)、纯阻性对称故障( $R_f = 50 \Omega$ , 故障持续0.1 s)下模型的正确性进行了验证, 系统动态特性分别见附录C图C1、C2。

由图7可知, 在交流母线发生三相短路接地故障前、故障期间以及故障后, MATLAB中动态相量模型的动态响应和PSCAD中电磁暂态模型的仿真结果基本一致, 验证了本文所建动态相量模型在交流母线发生对称故障下的正确性。同时, 在上述电感接地的相同工况下验证了特高压柔性直流换流站运行于整流模式的正确性, 动态特性图见附录C图C3。

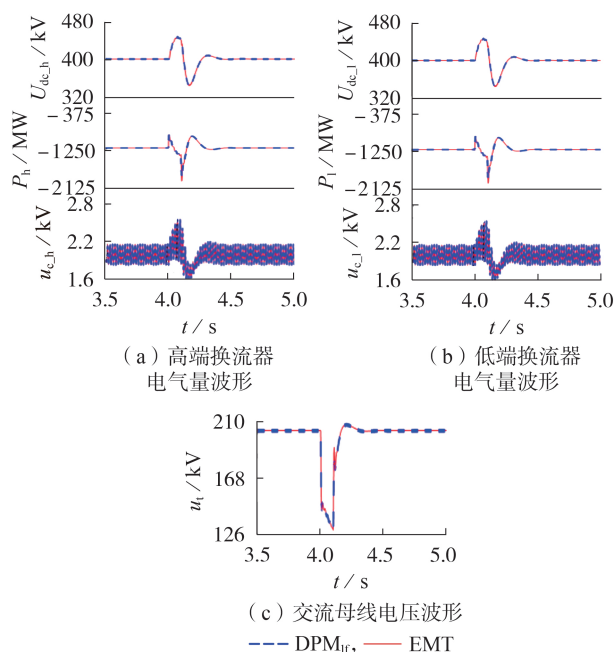


图7 感性接地故障时特高压柔性直流系统的动态特性  
Fig.7 Dynamic characteristics of VSC-UHVDC system under inductive earthing fault

### 3.2 动态相量模型准确度与效率的研究

对上述工况下动态相量解析模型的计算结果和电磁暂态模型的仿真结果进行对比,统计了动态相量解析模型的计算结果相对于电磁暂态模型的仿真结果的误差率,结果见附录D表D1—D3。结果表明,特高压柔性直流换流站动态相量模型的计算结果和电磁暂态模型的仿真结果非常接近,系统稳定时误差率基本维持在2%以下,系统波动较大时误差率也不超过5%,动态相量解析模型准确度较高。

同时,对动态相量解析模型和电磁暂态模型的实际仿真耗时进行了对比,电磁暂态模型是基于PSCAD/EMTDC V4.5中开发的高效MMC模型,对比结果如表1所示。由表可知,所建动态相量解析模型可以大幅度提高仿真效率。

表1 动态相量模型和电磁暂态模型的实际仿真耗时对比

Table 1 Actual simulation time comparison between dynamic phasor model and electromagnetic transient model

| 工况     | 实际仿真耗时/s |        |
|--------|----------|--------|
|        | 动态相量模型   | 电磁暂态模型 |
| 直流电流阶跃 | 4.87     | 381.66 |
| 感性接地故障 | 3.52     | 258.34 |
| 阻性接地故障 | 3.69     | 258.09 |

## 4 结论

本文针对特高压柔性直流换流站直流侧串联、交流侧并联的拓扑特征,建立了动态相量解析模型,以描述交流系统对称运行及三相对称故障下特高压

柔性直流换流站的动态过程。基于PSCAD/EMTDC搭建了特高压柔性直流系统的详细电磁暂态仿真模型,在直流电流阶跃变化、三相对称交流故障情况下,对比了所建动态相量解析模型与PSCAD详细电磁暂态模型的动态响应。结果表明,所建动态相量解析模型在准稳态及三相对称故障下具有很好的仿真精度与仿真速度。所建特高压柔性直流换流站的动态相量解析模型可为后续含有多座特高压柔性直流换流站的交直流混联电网的仿真研究提供一定的模型基础。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 张浩,彭克,刘盈杞,等. 基于MMC的柔性直流配电系统低频振荡机理分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):22-28.  
ZHANG Hao, PENG Ke, LIU Yingqi, et al. Low-frequency oscillation mechanism analysis of flexible DC distribution system based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 22-28.
- [2] 马文忠,张子昂,王晓,等. 一种能够清除直流故障和减少传感器数量的MMC子模块及其特性研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 87-92.  
MA Wenzhong, ZHANG Ziang, WANG Xiao, et al. Research on MMC submodule which can clear DC fault and reduce number of sensors and its characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 87-92.
- [3] 刘静佳,梅红明,刘树,等. 特高压多端混合直流输电系统阀组计划投/退控制方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 158-165.  
LIU Jingjia, MEI Hongming, LIU Shu, et al. Planned valve group entry/exit control method for UHV multi-terminal hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 158-165.
- [4] 郑安然,郭春义,崔鹏,等. 特高压混合多端直流输电系统中串联换流阀组间的电压平衡控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3408-3414.  
ZHENG Anran, GUO Chunyi, CUI Peng, et al. Voltage balancing control strategy of series-connected converter valve groups in hybrid multi-terminal UHVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3408-3414.
- [5] GNANARATHNA U N, GOLE A M, JAYASINGHE R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters(MMC) on electromagnetic transient simulation programs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 316-324.
- [6] XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, LIU Wenjing, et al. Accelerated model of modular multilevel converters in PSCAD/EMTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 129-136.
- [7] 许建中,赵成勇,刘文静. 超大规模MMC电磁暂态仿真提速模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 114-120, 11.  
XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, LIU Wenjing. Accelerated model of ultra-large scale MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 114-120, 11.
- [8] 许建中,赵成勇,GOLE A 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 A 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.
- [9] HAO Quanrui, LI Guojie, OOI B T. Approximate model and low-order harmonic reduction for high-voltage direct current tap based on series single-phase modular multilevel converter [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(9): 1046-1054.
- [10] SONG Q, LIU W, LI X, et al. A steady-state analysis method for a modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8):3702-3713.
- [11] XU Jianzhong, GOLE A M, ZHAO Chengyong. The use of averaged-value model of modular multilevel converter in DC grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 519-528.
- [12] 喻悦箫, 刘天琪, 王顺亮, 等. 基于平均值模型的双端 MMC-HVDC 系统小信号建模 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2999-3006, 3150.
- YU Yuexiao, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Small signal modeling of two-terminal MMC-HVDC based on AVM model [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10):2999-3006, 3150.
- [13] LIU S, XU Z, HUA W, 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.
- [14] 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.
- [15] 王全胜, 叶华, 张国民, 等. MMC 改进动态相量模型建模与仿真研究 [J]. 电网技术, 2018, 42(5):1636-1646.
- WANG Quansheng, YE Hua, ZHANG Guomin, et al. Research on modeling and simulation for improved MMC dynamic phasor model [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1636-1646.
- [16] LI T, GOLE A M, ZHAO Chengyong. Harmonic instability in MMC-HVDC converters resulting from internal dynamics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4):1738-1747.
- [17] 夏黄蓉, 韩民晓, 姚蜀军, 等. 模块化多电平换流器动态相量建模 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊2):120-127.
- XIA Huangrong, HAN Minxiao, YAO Shujun, et al. Dynamic phasor modeling of simplified modular multilevel converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (Supplement 2):120-127.
- [18] 郭春义, 殷子寒, 王烨, 等. LCC-MMC 型混合直流输电系统小干扰动态模型 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16):4705-4714, 4975.
- GUO Chunyi, YIN Zihan, WANG Ye, et al. Small-signal dynamic model of LCC-MMC hybrid HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16):4705-4714, 4975.
- [19] 鲁晓军, 林卫星, 安婷, 等. MMC 电气系统动态相量模型统一建模方法及运行特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20):5479-5491, 5724.
- LU Xiaojun, LIN Weixing, AN Ting, et al. A unified dynamic phasor modeling and operating characteristic analysis of electrical system of MMC [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (20):5479-5491, 5724.

#### 作者简介:



郑安然

郑安然(1995—),女,助理工程师,硕士,主要研究方向为直流输电等(E-mail: zhenganran1995@126.com);

郭春义(1984—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为直流输电、FACTS等(E-mail: chunyi.guo@outlook.com)。

(编辑 王欣竹)

## Dynamic phasor modeling of VSC-UHVDC converter station suitable for symmetrical fault simulation

ZHENG Anran<sup>1</sup>, GUO Chunyi<sup>2</sup>, WU Zidong<sup>1</sup>, TIAN Danyu<sup>1</sup>

(1. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Dongguan 523000, China;

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

**Abstract:** With many voltage source converter ultra-high voltage direct current (VSC-UHVDC) projects put into operation, it is necessary to establish an efficient and accurate model to study the operation characteristics of VSC-UHVDC converter station. A dynamic phasor analytical model of VSC-UHVDC converter station based on modular multilevel converter (MMC) is proposed, which can accurately describe the dynamic characteristics of VSC-UHVDC converter station under steady state and symmetrical fault. Firstly, the interface model between multi-converters and AC/DC system is re-established by studying the interaction between the high and low terminal converters at AC/DC sides. Then, combined with the MMC model considering internal harmonic characteristics, the dynamic phasor analytical model of VSC-UHVDC converter station is established. Through the modification of the AC side state space equation in the established dynamic phasor model, its applicability in the case of symmetrical fault in AC system is further extended. Finally, based on the electromagnetic transient simulation model in PSCAD/EMTDC, the correctness and efficiency of the established model under steady state and fault conditions are verified.

**Key words:** VSC-UHVDC converter station; high and low terminal converters; coupling relationship of AC/DC side; dynamic phasor analytical model

## 附录 A

$$\begin{aligned}
U_{td\_h} = & U_{sd} - I_{sd\_h} R_s - \omega L_s I_{sq\_h} - \left( I_{sd\_l} \cos(\theta\_l - \theta\_h) + I_{sq\_l} \sin(\theta\_l - \theta\_h) \right) (R_s + \omega L_s) - L_s \frac{dI_{sd\_h}}{dt} - \\
& L_s \left( \frac{dI_{sd\_l}}{dt} \cos(\theta\_l - \theta\_h) - I_{sd\_l} \sin(\theta\_l - \theta\_h) \left( \frac{d\theta\_l}{dt} - \frac{d\theta\_h}{dt} \right) + \frac{dI_{sq\_l}}{dt} \sin(\theta\_l - \theta\_h) + I_{sq\_l} \cos(\theta\_l - \theta\_h) \left( \frac{d\theta\_l}{dt} - \frac{d\theta\_h}{dt} \right) \right)
\end{aligned} \tag{A1}$$

$$\begin{aligned}
U_{\text{sq}_\perp\text{h}} = & U_{\text{sq}} - I_{\text{sq}_\perp\text{h}} R_s + \omega L_s I_{\text{sd}_\perp\text{h}} - \left( I_{\text{sq}_\perp} \cos(\theta_\perp - \theta_\text{h}) - I_{\text{sd}_\perp} \sin(\theta_\perp - \theta_\text{h}) \right) (R_s - \omega L_s) - I_s \frac{dI_{\text{sq}_\perp\text{h}}}{dt} - \\
& I_s \left( \frac{dI_{\text{sq}_\perp}}{dt} \cos(\theta_\perp - \theta_\text{h}) - I_{\text{sq}_\perp} \sin(\theta_\perp - \theta_\text{h}) \left( \frac{d\theta_\perp}{dt} - \frac{d\theta_\text{h}}{dt} \right) - \frac{dI_{\text{sd}_\perp}}{dt} \sin(\theta_\perp - \theta_\text{h}) - I_{\text{sd}_\perp} \cos(\theta_\perp - \theta_\text{h}) \left( \frac{d\theta_\perp}{dt} - \frac{d\theta_\text{h}}{dt} \right) \right)
\end{aligned} \tag{A2}$$

$$\begin{aligned}
U_{td_{\perp}} &= U_{td_h} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) - U_{tq_h} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) = \\
&\left[ U_{sd} - I_{sd_h} R_s - \omega L_s I_{sq_h} - \left( I_{sd_{\perp}} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) + I_{sq_{\perp}} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) \right) (R_s + \omega L_s) - L_s \frac{dI_{sd_h}}{dt} - \right. \\
&\quad L_s \left( \frac{dI_{sd_{\perp}}}{dt} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) - I_{sd_{\perp}} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) \left( \frac{d\theta_{\perp}}{dt} - \frac{d\theta_{_h}}{dt} \right) + \frac{dI_{sq_{\perp}}}{dt} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) + \right. \\
&\quad \left. \left. I_{sq_{\perp}} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) \left( \frac{d\theta_{\perp}}{dt} - \frac{d\theta_{_h}}{dt} \right) \right) \right] \cos(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) - \\
&\left[ U_{sq} - I_{sq_h} R_s + \omega L_s I_{sd_h} - \left( I_{sq_{\perp}} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) - I_{sd_{\perp}} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) \right) (R_s - \omega L_s) - L_s \frac{dI_{sq_h}}{dt} - \right. \\
&\quad L_s \left( \frac{dI_{sq_{\perp}}}{dt} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) - I_{sq_{\perp}} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) \left( \frac{d\theta_{\perp}}{dt} - \frac{d\theta_{_h}}{dt} \right) - \frac{dI_{sd_{\perp}}}{dt} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) - \right. \\
&\quad \left. \left. I_{sd_{\perp}} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) \left( \frac{d\theta_{\perp}}{dt} - \frac{d\theta_{_h}}{dt} \right) \right) \right] \sin(\theta_{\perp} - \theta_{_h}) \quad (A3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[ U_{sq} - I_{sq,h} R_s + \omega L_s I_{sd,h} - \left( I_{sq,l} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) - I_{sd,l} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) \right) (R_s - \omega L_s) - L_s \frac{dI_{sq,h}}{dt} - \right. \\
& L_s \left( \frac{dI_{sq,l}}{dt} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) - I_{sq,l} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) \left( \frac{d\theta_{\perp}}{dt} - \frac{d\theta_{\perp,h}}{dt} \right) - \frac{dI_{sd,l}}{dt} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) - \right. \\
& \left. \left. I_{sd,l} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) \left( \frac{d\theta_{\perp}}{dt} - \frac{d\theta_{\perp,h}}{dt} \right) \right) \right] \cos(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) + \\
& \left[ U_{sd} - I_{sd,h} R_s - \omega L_s I_{sq,h} - \left( I_{sd,l} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) + I_{sq,l} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) \right) (R_s + \omega L_s) - L_s \frac{dI_{sd,h}}{dt} - \right. \\
& L_s \left( \frac{dI_{sd,l}}{dt} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) - I_{sd,l} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) \left( \frac{d\theta_{\perp}}{dt} - \frac{d\theta_{\perp,h}}{dt} \right) + \frac{dI_{sq,l}}{dt} \sin(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) + \right. \\
& \left. \left. I_{sq,l} \cos(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h}) \left( \frac{d\theta_{\perp}}{dt} - \frac{d\theta_{\perp,h}}{dt} \right) \right) \right] \sin(\theta_{\perp} - \theta_{\perp,h})
\end{aligned} \tag{A4}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} U_{td\_1} = U_{td\_h} \cos(\theta\_1 - \theta\_h) - U_{tq\_h} \sin(\theta\_1 - \theta\_h) = \\ \quad \left[ R_f I_{sd} - R_f I_{sd\_h} - R_f I_{sd\_1} \cos(\theta\_1 - \theta\_h) - R_f I_{sq\_1} \sin(\theta\_1 - \theta\_h) \right] \cos(\theta\_1 - \theta\_h) - \\ \quad \left[ R_f I_{sq} - R_f I_{sq\_h} - R_f I_{sq\_1} \cos(\theta\_1 - \theta\_h) + R_f I_{sd\_1} \sin(\theta\_1 - \theta\_h) \right] \sin(\theta\_1 - \theta\_h) \\ U_{tq\_1} = U_{tq\_h} \cos(\theta\_1 - \theta\_h) + U_{td\_h} \sin(\theta\_1 - \theta\_h) = \\ \quad \left[ R_f I_{sq} - R_f I_{sq\_h} - R_f I_{sq\_1} \cos(\theta\_1 - \theta\_h) + R_f I_{sd\_1} \sin(\theta\_1 - \theta\_h) \right] \cos(\theta\_1 - \theta\_h) + \\ \quad \left[ R_f I_{sd} - R_f I_{sd\_h} - R_f I_{sd\_1} \cos(\theta\_1 - \theta\_h) - R_f I_{sq\_1} \sin(\theta\_1 - \theta\_h) \right] \sin(\theta\_1 - \theta\_h) \end{array} \right. \quad (A10)$$

## 附录 B

表 B1 特高压柔性直流输电系统参数  
Table B1 Parameters of VSC-UHVDC system

| 系统        | 参数                     | 参数值                               |
|-----------|------------------------|-----------------------------------|
| 高低阀组及交流系统 | 高低阀组额定功率 $P_i$         | 单极 1 250 MW                       |
|           | 高低阀组额定直流电压 $U_{dc\_i}$ | 400 kV                            |
|           | 交流系统短路比 SCR            | $3 \angle 85^\circ$               |
|           | 交流系统电压等级               | 500 kV                            |
|           | 联接变压器漏抗 $L_t$          | 0.15 p.u.                         |
|           | 高低阀组子模块数 $N$           | 200                               |
|           | 高低阀组桥臂电感 $L_{arm}$     | 30 mH                             |
|           | 高低阀组桥臂电阻 $R_{arm}$     | 1 $\Omega$                        |
|           | 高低阀组子模块电容 $C_{SM}$     | 18 000 $\mu$ F                    |
| 直流系统      | 整流侧电流源                 | 3.125 kA                          |
|           | 线路长度 $l$               | 400 km                            |
|           | 电阻 $R_0$               | 0.0127 $\Omega$ /km               |
|           | 电感 $L_0$               | 0.88 mH/km                        |
|           | 电容 $C_0$               | 0.013 $\mu$ F/km                  |
| 控制系统      | 高低阀组定直流电压控制器参数         | $k_{p1}=2$ 、 $k_{i1}=50$          |
|           | 高低阀组定无功功率控制器参数         | $k_{p2}=0.5$ 、 $k_{i2}=150$       |
|           | 高低阀组内环 $d$ 轴控制器参数      | $k_{p3}=1$ 、 $k_{i3}=5$           |
|           | 高低阀组内环 $q$ 轴控制器参数      | $k_{p4}=1$ 、 $k_{i4}=5$           |
|           | 高低阀组 CCSC 控制器参数        | $k_{pcir}=1$ 、 $k_{icir}=100$     |
|           | 高低阀组 PLL 参数            | $k_{p\_pll}=10$ 、 $k_{i\_pll}=50$ |
|           | 高低阀组电压测量时间常数           | $T_{mud}=T_{muq}=2$ ms            |
|           | 高低阀组电流测量时间常数           | $T_{mid}=T_{miq}=0.2$ ms          |

## 附录 C

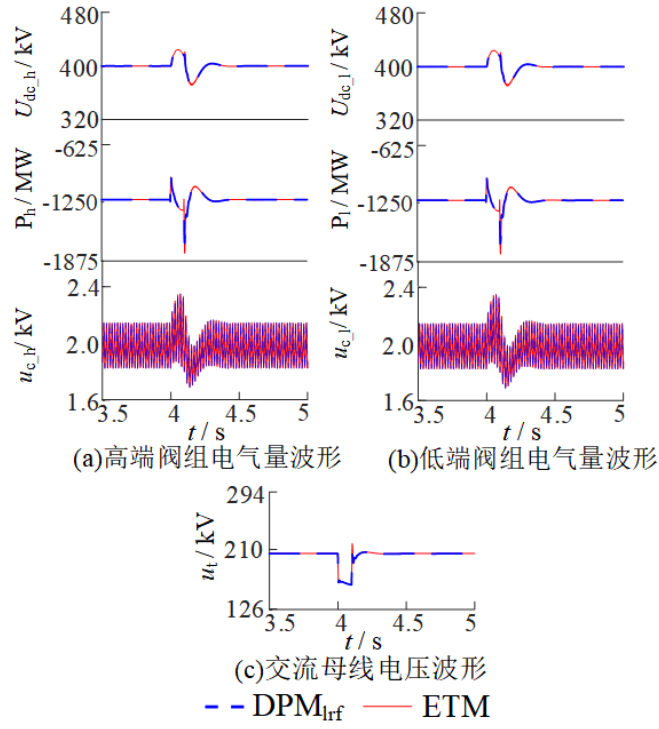


图 C1 感性与阻性接地故障时特高压柔直系统的动态特性

Fig.C1 Dynamic characteristics of VSC-UHVDC under inductive and resistive fault earthing

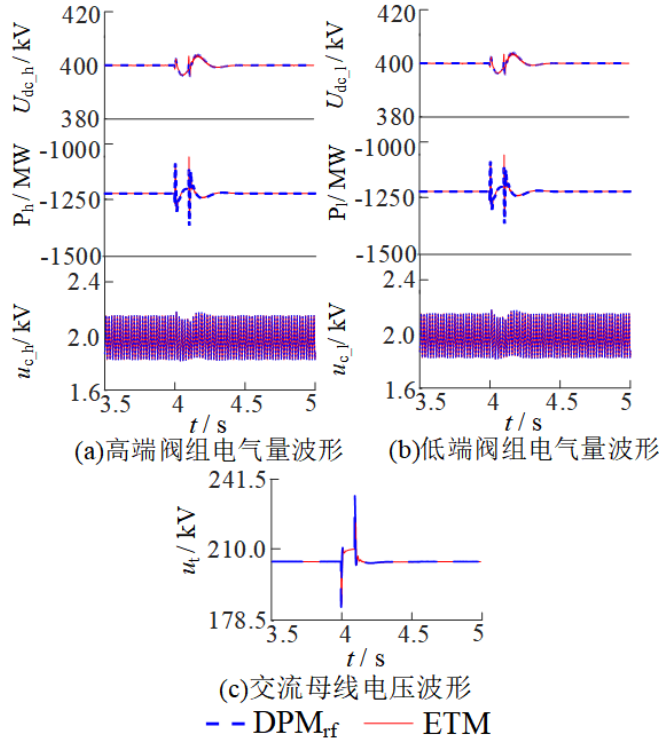


图 C2 阻性接地故障时特高压柔直系统的动态特性

Fig.C2 Dynamic characteristics of VSC-UHVDC under resistive fault earthing

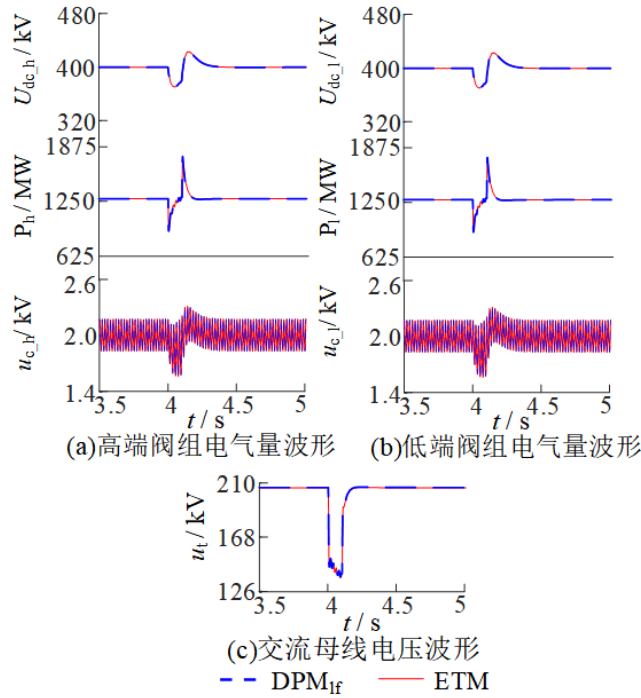


图 C3 感性接地故障时特高压以整流模式运行的动态特性

Fig.C3 Dynamic characteristics of VSC-UHVDC in rectifier mode under inductive fault earthing

## 附录 D

表 D1 电流阶跃工况下典型电气参数的误差率

Table D1 Error rate of typical electrical parameters under current step

| 状态                    | 高端阀组直流电<br>压/% | 低端阀组直流电<br>压/% | 高端阀组子模块<br>电容电压/% | 高端阀组子模块<br>电容电压/% | 交流母线电压<br>/% |
|-----------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 阶跃刚发生不久<br>(4.1 s 时)  | 1.73           | 1.72           | 0.19              | 0.18              | 1.27         |
| 阶跃后系统稳定<br>(4.5 s 时)  | 0.13           | 0.14           | 0.17              | 0.17              | 0.13         |
| 结束阶跃后系统稳<br>定 (6 s 时) | 0.17           | 0.17           | 0.16              | 0.15              | 0.11         |

表 D2 感性接地故障下典型电气参数的误差率

Table D2 Error rate of typical electrical parameters under current inductive fault earthing

| 状态                      | 高端阀组直流电<br>压/% | 低端阀组直流电<br>压/% | 高端阀组子模块<br>电容电压/% | 高端阀组子模块<br>电容电压/% | 交流母线电压<br>/% |
|-------------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 故障刚结束(4.1 s<br>时)       | 0.47           | 0.46           | 0.20              | 0.19              | 4.88         |
| 故障消失后波动中<br>(4.2 s 时)   | 0.14           | 0.16           | 0.13              | 0.13              | 0.11         |
| 故障消失系统恢复<br>稳定 (4.5s 时) | 0.21           | 0.20           | 0.19              | 0.17              | 0.17         |

表 D3 阻性接地故障下典型电气参数的误差率

Table D3 Error rate of typical electrical parameters under current resistive fault earthing

| 状态                       | 高端阀组直流电<br>压/% | 低端阀组直流电<br>压/% | 高端阀组子模块<br>电容电压/% | 高端阀组子模块<br>电容电压/% | 交流母线电压<br>/% |
|--------------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------|
| 故障刚结束(4.1 s<br>时)        | 0.93           | 0.94           | 0.18              | 0.20              | 4.09         |
| 故障消失后波动中<br>(4.2 s 时)    | 0.11           | 0.12           | 0.14              | 0.13              | 0.31         |
| 故障消失系统恢复<br>稳定 (4.5 s 时) | 0.17           | 0.18           | 0.13              | 0.13              | 0.15         |