

基于桥臂基波平均开关函数的 MMC 模型 在直流电网仿真中的应用

孙谦浩¹, 李亚楼², 宋强¹, 左鹏³, 王裕¹, 孟经伟¹, 穆清²

(1. 清华大学电机系, 北京 100084;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;

3. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘要:在直流电网的研究中,模块化多电平换流器(MMC)的建模起着至关重要的作用。鉴于此,提出了一种基于桥臂基波平均开关函数的 MMC 行为模型,相比于已有的以桥臂为基本建模单元的 MMC 模型,该模型将 MMC 的解锁运行状态与闭锁运行状态结合为一个整体,且模型主电路中只采用了受控电压源、不变电阻以及二极管等静态元件,进而可以在现有的仿真软件上完成模型的图形化搭建而无需重新进行元件的编码与数值计算处理;同时,在所提出的模型中,由于桥臂基波平均开关函数可以直接从控制系统中得到,而无需通过调制系统,因此简化了整个模型的搭建与调试。通过与详细模型的对比实验,验证了所提行为模型的精确性与快速性。采用上述建模方法,对一个四端金属回线接地真双极直流环网的直流故障特性进行了仿真分析与研究。仿真结果表明金属回线的阻抗及接地电极的位置与阻抗都会影响接地性直流故障的故障电流,但对于双极故障则不会产生任何影响;而直流电抗器的使用,则会对双极故障具有“改善”作用,但随着直流电抗器值的增加,“改善”作用的提高程度越来越不明显。

关键词:桥臂基波平均开关函数;直流电网;MMC 行为模型;电磁暂态建模;直流故障;金属回线

中图分类号:TM 761;TM 46

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.004

0 引言

近年来,柔性直流电网技术逐渐吸引了很多研究者的注意^[1-3]。文献[4]对多端柔性直流电网的回路参数计算进行了分析;文献[5-8]对多端柔性直流电网的控制策略研究现状进行了介绍;文献[9-10]对适用于风电输送的直流电网系统进行了研究;文献[11]对不含直流断路器的辐射式直流系统故障策略进行了研究。但对于包含直流断路器的真双极金属回线接地直流环网的故障特性目前仍关注较少,尤其是金属回线、直流侧接地电极阻抗与位置以及直流电抗器对故障暂态特性的影响少有文献涉及。鉴于此,本文主要针对多端直流环网的故障特性进行研究与分析。

由于目前模块化多电平换流器(MMC)的已有模型主要用于换流器级分析或进行大规模交直流系统稳态分析,如文献[12-14]针对 MMC 分别提出了基于 IGBT 等效以及戴维南等效的详细模型;文献[15-16]针对子模块(SM)数量巨大的 MMC 提出了平均值模型。上述 2 种模型,前者在应用于多端直流系统暂态仿真时由于开关状态过多而缺乏仿真效率性;后者则由于建模的原理,在直流故障暂态过程中缺乏仿真精度。因此,一些文献对上述模型进行

了改进,文献[17]与文献[18-20]分别基于 MMC 子模块与 MMC 桥臂建立了 MMC 的加速仿真模型。其中,文献[17]的模型由于将子模块分割为单独的一个子系统,因此在故障仿真时,难以调整其等效电压源的参数;文献[18]的模型将闭锁状态下的 MMC 桥臂与解锁状态下的 MMC 桥臂分割为 2 种模型,但缺乏建模的编译性与计算效率性;文献[19]的模型由于在控制系统与主电路的连接方式处采用了桥臂的投入模块数,因此 MMC 的控制系统中必须包含调制模块以计算桥臂各子模块的投入状态,从而造成了控制系统建模复杂,模型调试繁琐;文献[20]提出的基于分块交接变量方程法的快速模型虽然也是以 MMC 桥臂为单元,但该仿真方法的理论依据是桥臂子模块戴维南等效模型的复合,因此模型需要单独编码并进行数值计算处理,影响了建模的便利性与拓扑修改的可操作性。鉴于此,本文提出了基于 MMC 桥臂平均开关函数的行为模型。不同于上述文献中的建模方法,该模型不仅将 MMC 的闭锁状态与解锁状态整合为一体,且在模型的主电路中所有元件均为静态元件,同时,模型中唯一的动态元件为理想开关,该元件的主要作用是切换 MMC 的不同运行状态,因此可以采用现有的仿真软件进行模型的图形化编程,而不需要专门的编码与数值计算处理;同时,由于桥臂平均开关函数的引入,换流器的控制系统与主电路之间可以直接进行信号的交互,减小了建模的复杂度与调试难度。基于 PSCAD/EMTDC

收稿日期:2017-07-19;修回日期:2018-05-20

基金项目:国家电网公司科技项目(52100116003D)

Project supported by the Science and Technology Foundation of State Grid Corporation of China(52100116003D)

仿真软件的对比实验证明了所提模型的仿真精度与仿真效率。

基于上述的 MMC 行为模型,本文对多端直流环网的故障特性进行了仿真研究。分别分析了发生正极接地故障、负极接地故障以及双极短路故障时,金属回线对故障特性的影响;同时对发生双极短路故障时直流故障电抗器的影响也进行了分析与研究。仿真结果表明金属回线的电感值及其接地点对于接地性故障具有改善故障特性的作用;而对于双极短路故障则没有影响。同时,通过选择合理的直流电抗器与直流侧接地电极电抗,将有助于直流故障电流的清除与直流电网运行可靠性的提高。

1 基于桥臂基波平均开关函数的 MMC 模型

1.1 MMC 拓扑结构、数学模型及控制系统

MMC 的电路拓扑结构如图 1(a) 所示。三相 MMC 由 6 个桥臂构成,每个桥臂由 N 个半桥子模块串联而成。图中, L 为桥臂电感; C_0 为子模块电容; i_{pj} 、 i_{nj} ($j=a,b,c$) 分别为 j 相上、下桥臂电流; u_{jp} 、 u_{jn} 分别为 j 相上、下桥臂所有子模块电容电压和; i_{vj} 为 j 相交流电流; u_{vj} 为 j 相阀侧交流电压; I_{dc} 为直流电流; U_{dc} 为直流电压。

根据文献[16]可知 MMC 的数学模型为:

$$\begin{cases} u_{vj} = e_j - \frac{R}{2} i_{vj} - \frac{L}{2} \frac{di_{vj}}{dt} \\ u_{j\text{unb}} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{j\text{com}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 为 MMC 损耗等效电阻; $u_{j\text{unb}}$ 为 MMC 中 j 相的内部不平衡电压降; e_j 为 MMC 中 j 相的可控内部电动势; $u_{j\text{com}}$ 为 MMC 的 j 相共模电压。以上各变量值可通过式(2)~(4)求得:

$$\begin{cases} u_{j\text{com}} = L \frac{di_{j\text{com}}}{dt} + Ri_{j\text{com}} \\ e_j = u_{j\text{dif}} \end{cases} \quad (2)$$

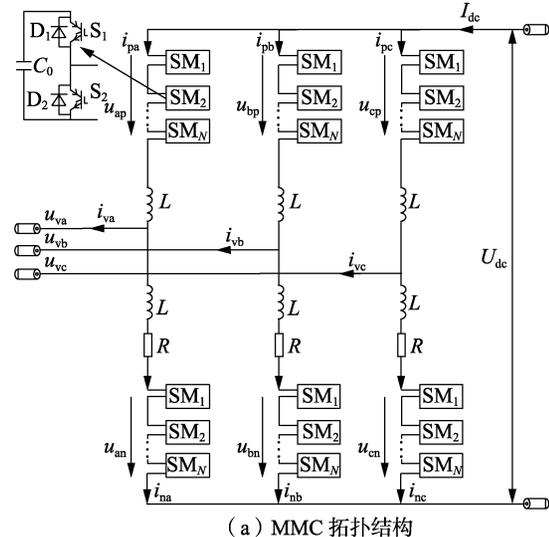
$$\begin{cases} i_{j\text{com}} = \frac{1}{2} i_{pj} + \frac{1}{2} i_{nj} \\ i_{j\text{dif}} = -\frac{1}{2} i_{pj} + \frac{1}{2} i_{nj} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{j\text{com}} = \frac{1}{2} u_{jp} + \frac{1}{2} u_{jn} \\ u_{j\text{dif}} = -\frac{1}{2} u_{jp} + \frac{1}{2} u_{jn} \end{cases} \quad (4)$$

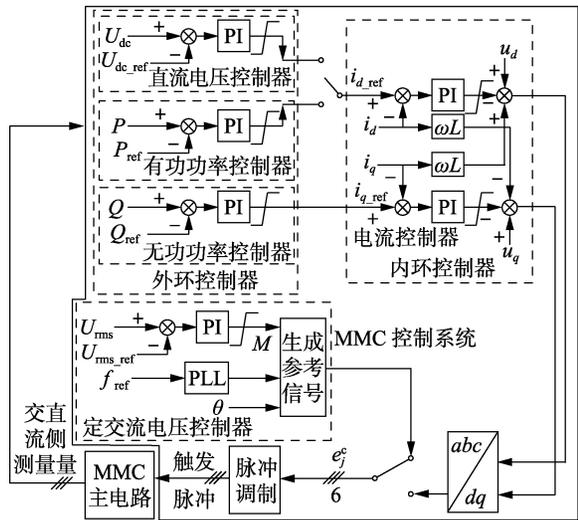
其中, $u_{j\text{dif}}$ 为 MMC 的 j 相差模电压; $i_{j\text{com}}$ 为 MMC 的 j 相共模电流; $i_{j\text{dif}}$ 为 MMC 的 j 相差模电流。

根据式(1)可知,通过改变 MMC 中 j 相的可控内部电动势 e_j 的值,便可以对 MMC 的交流侧输出电压值与电流值进行控制,而 e_j 则可以根据 MMC 的不

同工作模式,由外环控制器和内环控制器同时作用得到,如图 1(b) 所示的 MMC 的整个控制系统原理图。在控制系统中,可控内部电动势 e_j^e 为控制系统生成的基波正弦量参考波,而不是数学模型中包含各次谐波的实际阶梯波电气量,因此传统的 MMC 模型中,若涉及控制系统的建模,均需通过调制环节将参考波转换为各子模块的触发脉冲信号后与 MMC 主电路进行交互,如图 1(b) 所示。



(a) MMC 拓扑结构



(b) MMC 控制系统

图 1 MMC 拓扑结构与控制系统

Fig.1 Topology and control system of MMC

1.2 MMC 桥臂基波平均开关函数的定义

MMC 运行时,所有子模块均具有 3 种运行状态:当 MMC 处于闭锁状态时,所有子模块中的 S_1 与 S_2 均处于闭锁状态;当 MMC 处于解锁状态时, S_1 与 S_2 交替导通,当 S_1 导通时子模块电容处于投入状态,此时子模块输出电压等于电容电压值,当 S_2 导通时子模块电容处于切除状态,此时子模块输出电压为 0。MMC 无论处于稳态运行还是暂态运行,其子模块状态均在 3 种状态内切换。设 MMC 解锁状态下 j 相上(下)桥臂的第 i ($i=1,2,\dots,N$) 个子模块

的开关函数为:

$$S_{\text{smjp}(n)i}(t) = \begin{cases} 1 & S=1 \\ 0 & S=0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, S 为子模块的状态, 当子模块投入时 $S=1$ 成立, 否则 $S=0$ 成立。

MMC 运行时, 忽略各子模块电容电压的差异 (即假设同一桥臂电容电压的离散度为 0), 则 j 相的所有子模块满足以下关系:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N S_{\text{smjpi}} + \sum_{i=1}^N S_{\text{smjni}} = N \\ \sum_{i=1}^N S_{\text{smjni}} - \sum_{i=1}^N S_{\text{smjpi}} = e_j / U_{\text{csm}} \\ \sum_{i=1}^N S_{\text{smjni}} + \sum_{i=1}^N S_{\text{smjpi}} = u_{j\text{com}} / U_{\text{csm}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, U_{csm} 为子模块的电容电压。因此, 若定义 MMC j 相的相开关函数 S_j 为:

$$S_j = e_j / (2U_{\text{csm}}) \quad (7)$$

则 j 相上、下桥臂的开关函数为:

$$\begin{cases} S_{jp} = \sum_{i=1}^N S_{\text{smjpi}} = N/2 - S_j \\ S_{jn} = \sum_{i=1}^N S_{\text{smjni}} = N/2 + S_j \end{cases} \quad (8)$$

将上、下桥臂的开关函数分别进行傅里叶分解可得:

$$\begin{cases} S_{jp} = \frac{N}{2} - \left[\frac{NM \sin(\omega_1 t)}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} A_n \sin(\omega_n t) \right] \\ S_{jn} = \frac{N}{2} + \left[\frac{NM \sin(\omega_1 t)}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} A_n \sin(\omega_n t) \right] \end{cases} \quad (9)$$

其中, M 为调制比; A_n 为各次谐波的幅值。当子模块数足够多时, 在计算中可以忽略式(9)的高次谐波, 可得 MMC 桥臂基波平均开关函数的定义为:

$$S(t) = \begin{cases} \frac{1-M \sin(\omega_1 t)}{2} = \frac{1-e_j^c}{2} & \text{上桥臂} \\ \frac{1+M \sin(\omega_1 t)}{2} = \frac{1+e_j^c}{2} & \text{下桥臂} \end{cases} \quad (10)$$

从式(10)中可知, 桥臂基波平均开关函数可由控制系统通过计算直接得到。

1.3 MMC 行为模型的建模方法

由 1.2 节可知, MMC 在系统中运行时有 2 种基本运行状态, 即闭锁状态与解锁状态, 分别对 2 种状态下的 MMC 进行建模分析。

1.3.1 MMC 闭锁状态下行为模型

闭锁状态下, MMC 中所有桥臂子模块的所有 IGBT 均闭锁, 以 j 相上桥臂 (或下桥臂) 为例, 此时该桥臂上的各子模块的等效电路如图 2(a) 中左侧

图所示。当桥臂电流 $i_{\text{arm}} > 0$ 时, 所有子模块中的 D_{n1} ($n=1, 2, \dots, N$) 导通, D_{n2} 截止, 桥臂中所有子模块的电容都串联到桥臂中, 此时桥臂可以等效为一个电压源 u_0 , 同时, 图 2(a) 右侧图中的 $i_0 = i_{\text{arm}}$; 相反, 当桥臂电流 $i_{\text{arm}} < 0$ 时, 所有子模块中的 D_{n2} 导通, D_{n1} 截止, 此时所有子模块被短路, 桥臂电压值为 0, 图 2(a) 右侧图中的 $i_0 = 0$ 。因此, 闭锁状态下的 MMC 桥臂模型可以等效为图 2(a) 中右侧图所示。

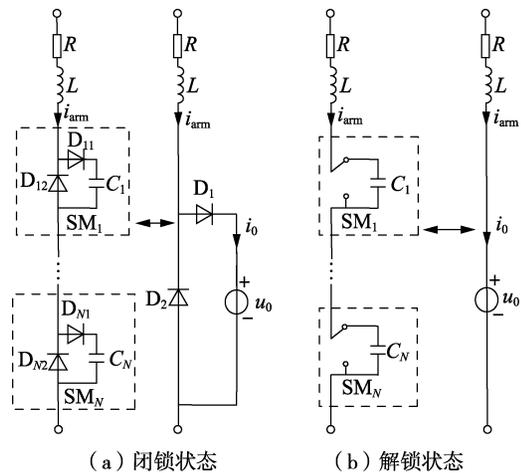


图 2 MMC 闭锁或解锁状态下的等效桥臂模型

Fig.2 Equivalent arm model of MMC under block state or unlock state

设桥臂中第 n 个子模块的电容值为 C_n , 则闭锁状态下桥臂的等效电容值为:

$$C_{\text{arm}} = 1 / \sum_{n=1}^N \frac{1}{C_n} \quad (11)$$

子模块电容电压波动是由电容电流的变化引起的, 在图 2(a) 右侧图中则体现为等效电压源 u_0 与其电流 i_0 之间的关系:

$$u_0 = \frac{1}{C_{\text{arm}}} \int_{t_0}^t i_0(t) dt = \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{C_n} \right) \int_{t_0}^t i_0(t) dt \quad (12)$$

1.3.2 MMC 解锁状态下行为模型

解锁状态下, 当桥臂子模块处于投入状态时, 子模块输出电压为电容电压, 当桥臂子模块处于切除状态时, 子模块输出电压为 0, 等效电路如图 2(b) 中左侧图所示。

在图 2(b) 中, 当系统解锁时, 桥臂电流 $i_{\text{arm}} = i_0$ 永远成立, 因此, 流过子模块的平均电容电流值为:

$$i_c(t) = S_{\text{sm}}(t) i_0(t) = S(t) i_{\text{arm}}(t) \quad (13)$$

电容电流的变化会引起电容电压的波动, 解锁状态下桥臂子模块电压总和为:

$$\sum u_c = \frac{1}{C_{\text{arm}}} \int_{t_0}^t i_c(t) dt = \frac{1}{C_{\text{arm}}} \int_{t_0}^t S(t) i_{\text{arm}}(t) dt \quad (14)$$

因此解锁状态下图 2(b) 右侧图中的等效电压源电压值为:

$$u_0 = S(t) \sum u_c = \frac{S(t)}{C_{arm}} \int_{t_0}^t i_c(t) dt = \frac{S(t)}{C_{arm}} \int_{t_0}^t S(t) i_0(t) dt \quad (15)$$

1.3.3 MMC 全状态下行为模型

综上所述,可得 MMC 的 j 相上桥臂(或下桥臂)在全部状态下的等效模型如图 3 所示。当 MMC 运行在闭锁状态时,开关 Ctrl 打开,MMC 上桥臂主电路与图 2(a)中右侧图相同,此时受控电压源的电压值由开关 block 的 1 端值决定;当 MMC 运行在解锁状态时,开关 Ctrl 闭合,此时受控电压源的电压值由开关 block 的 2 端值决定,由于该值永远大于 0,所以二极管 D_2 处于反向截止状态而不会导通,这样,MMC 上桥臂主电路与图 2(b)中右侧图相同。从图 3 中可知,MMC 的行为模型在闭锁状态或解锁状态下,电路的拓扑结构都不发生变化,只有在状态切换时,电路模型才会有所变化,即 MMC 在某一状态下运行时,系统的节点导纳矩阵不变,从而加速了整个系统的计算过程,提高了仿真效率。同时,由于桥臂基波开关函数直接可以由控制系统通过简单计算得到,因此,模型的控制系统搭建简单,调试方便。

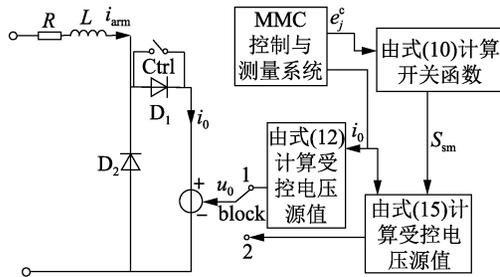


图 3 MMC 单个桥臂整体模型

Fig.3 Arm model of MMC under all states

2 真双极金属回线接地多端直流环网系统故障特性仿真研究

2.1 金属回线接地多端直流环网系统

图 4 为本文所研究的金属回线接地多端直流环网系统

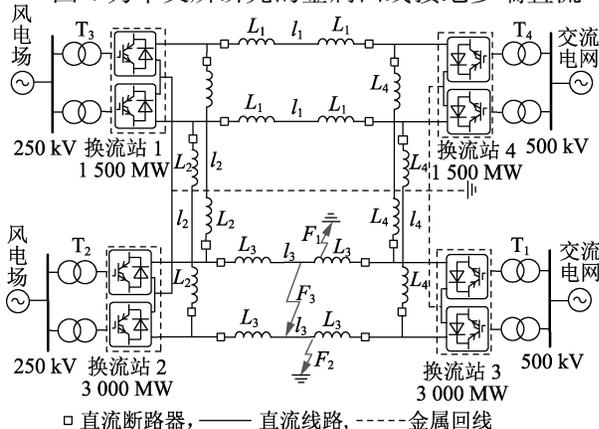


图 4 多端直流环网结构

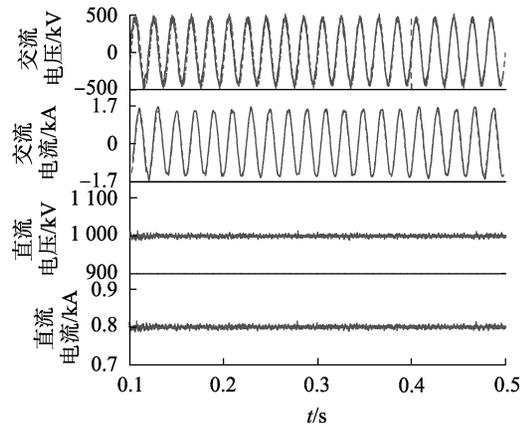
Fig.4 Structure of multi-terminal DC ring network

网系统算例。系统参数为: $l_1 = 207$ km, $l_2 = 49.5$ km, $l_3 = 189.6$ km, $l_4 = 176.5$ km, 直流故障限流电抗器 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 200$ mH, T_1 变比为 525 kV/260 kV, T_2 、 T_3 、 T_4 变比均为 230 kV/260 kV。

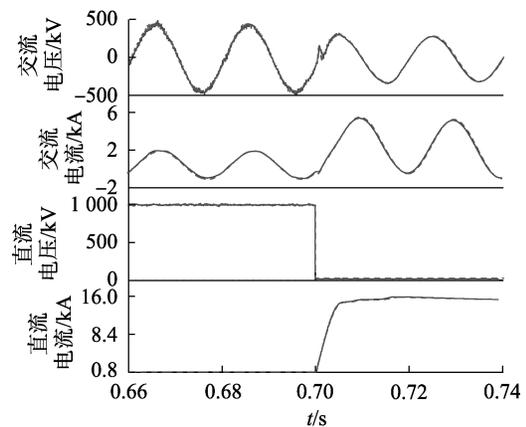
2.2 基于桥臂基波平均开关函数的 MMC 行为模型在直流电网仿真中的仿真精度与仿真效率验证

针对图 4 所示的多端直流系统,分别搭建了基于 MMC 详细模型、MMC 传统开关函数模型、MMC 行为模型的多端直流输电系统,并进行了稳态及换流站 3 端口处双极短路故障对比仿真,仿真波形如图 5 与图 6 所示。从图 5 与图 6 中可知,与详细模型及传统开关函数模型相比,无论是稳态还是双极故障暂态,MMC 行为模型都具有很高的仿真精度。同时由于 MMC 行为模型是基于桥臂开关函数的基波建立的,因此相比于传统的开关函数模型,其仿真结果中直流电压与直流电流均不含谐波,但该差别对于换流器在直流电网的应用特性分析影响很小,因此在不研究 MMC 级谐波行为的情况下,可以忽略该差别。

表 2 给出了 MMC 不同仿真模型的仿真效率比



(a) 稳态对比结果



(b) 暂态对比结果

—— 详细模型, - - - - 行为模型

图 5 MMC 行为模型与详细模型仿真结果对比

Fig.5 Comparison of simulative results between behavior model and detailed model

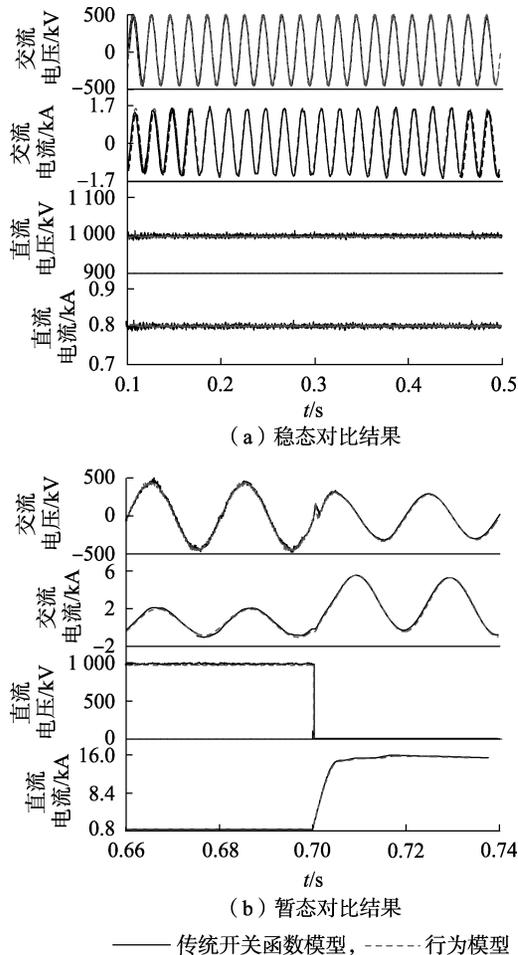


图6 MMC行为模型与传统开关函数模型仿真结果对比
Fig.6 Comparison of simulative results between behavior model and traditional switching function model

较结果(系统仿真时间为10 s)。从中可知,基于MMC行为模型的多端直流系统具有很高的仿真效率,相比于详细模型与传统的开关函数模型,该模型由于不需要调制环节的计算与仿真,可以极大地节省仿真时间,提高仿真速度,在大规模多换流器的直流电网仿真中具有较好的应用前景。

表2 MMC不同仿真模型的仿真效率对比

Table 2 Simulative efficiency comparison among different MMC models

仿真步长/ μs	仿真时间		
	详细模型	传统开关函数模型	所提行为模型
20	158 min	60 min 14 s	32 min 7 s
50	85 min 12 s	24 min 35 s	13 min 18 s
100	43 min 1 s	13 min 7 s	6 min 54 s

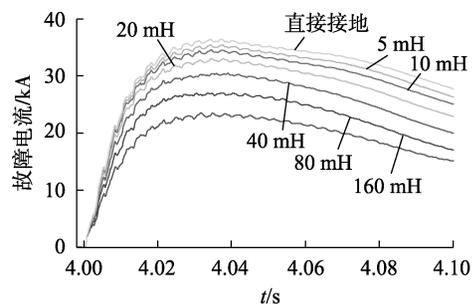
2.3 金属回线与直流电抗器对直流故障的影响分析与仿真研究

以上述基于MMC行为模型的直流电网模型为基础,对直流环网的直流故障特性进行了研究。当系统直流侧发生正极或负极接地短路时,短路电流都将流过金属回线的一部分,因此金属回线的等效

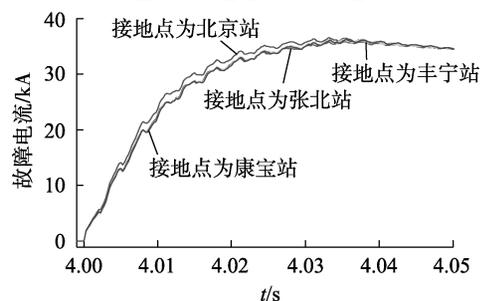
电阻值与等效电抗值都将影响故障电流的大小与上升速率;同时,当多端直流系统对的接地电极选取不同时,也会造成金属回线中流过短路电流部分的等效阻抗也会不同,从而对故障电流的影响也不同。

图7(a)给出了金属回线接地点在线路 l_3 中点、换流站3直流电抗器端口发生正极接地故障时,不同金属回线的电感值对故障电流影响的仿真结果。从图7(a)中可以看出,所有金属回线的接地系统中,故障电流最大值与故障电流上升率均小于直接接地系统;且随着金属回线电感值的不断增大,故障电流的最大值不断减小,同时故障电流的上升率也不断下降,说明了金属回线电感值对于接地故障时的故障电流具有“改善”作用。

图7(b)给出了同一金属回线下,当金属回线接地点不同时故障电流的波形比较。从图中可以看出,当只有1个接地点时,不同接地点对故障电流大小的影响不同,因此在系统设计时可以选择合理的接地点来满足对故障电流限制的要求。



(a) 金属回线电感值对故障电流的影响



(b) 金属回线接地点对故障电流的影响

图7 金属回线电感及接地点对接地故障电流的影响

Fig.7 Impact of metal return line inductance and grounding point on fault current

当系统发生双极短路时,如图4中的 F_3 所示,此时,故障电流并不流经金属回线线路,而是通过直流线路进行流通,因此金属回线的等效阻抗对双极故障没有作用,但串联在直流线路中的直流电抗器将会对双极故障电流起到“改善”作用。图8给出了直流电抗器的值变化时,双极短路故障电流的大小及上升率的变化情况。从图8(a)、(b)可知,故障电流最大值、电流上升率都与直流电抗器的值负相关,且随着直流电抗器的不断增大,其对直流故障电流的“改善”作用在不断减小;同时直流电抗器的过度

增加,将会导致系统的稳定性问题出现,图 8(c)为直流电抗器过大时系统直流电压波形(单极),从图中可以看出,换流站 1—4 的端口电压已经出现周期性振荡。因此在实际应用中,应选取合理的直流电抗器的值。

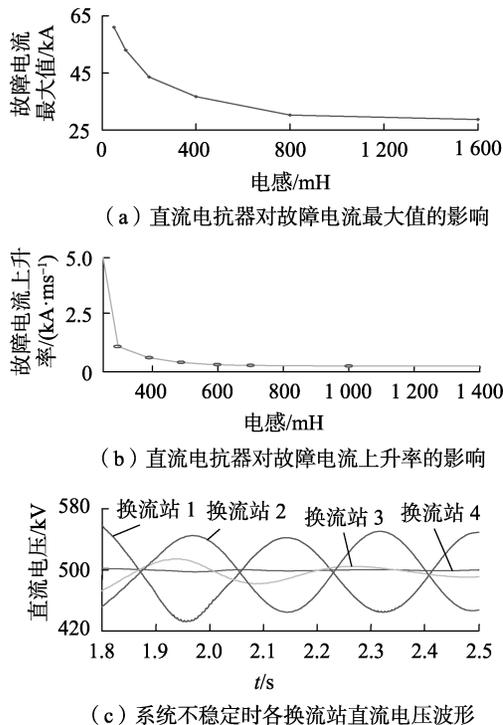


图 8 直流电抗器对双极故障电流的影响

Fig.8 Impact of DC reactor on bipolar fault current

3 结论

针对多端直流输电系统的建模及仿真分析研究,本文提出了基于桥臂基波平均开关函数的 MMC 行为模型。相比于已有模型,该模型的主要特点如下:

a. 建模的基本理论为桥臂整体的基波平均开关函数,因此可以直流利用控制系统的正弦参考波来进行模型的搭建,而不需要通过调制系统来获得桥臂子模块的开关函数,方便模型的调试与测试,且模型搭建过程简单;

b. 在单个运行状态下,换流器主电路只采用可控电压源、二极管、电阻以及电感等静态元件构成,仿真系统节点导纳矩阵不变,仿真效率明显提高;

c. 主电路系统建模过程中并未采用戴维南等效,因此模型可以适用于现有的任意电磁暂态仿真软件,而不需要进行专门的编码与数值处理;

d. 将 MMC 闭锁状态与解锁状态整合为一个整体,可以模拟 MMC 的启动、稳态以及暂态等几乎所有的运行状态,尤其对于多端直流电网的故障仿真研究,在保证仿真精度的基础上明显提高了仿真效率;

e. 通过采用理想开关来区分 MMC 的不同运行状态,且可通过增加受控电压源以及理想开关来模

拟不同拓扑结构的 MMC 行为,模型建立及修改方便。

基于该 MMC 行为模型,针对四端直流环网,本文对多端直流环网的接地故障与双极故障进行了仿真研究。针对接地故障,仿真分析了金属回线阻抗及其接地点对故障电流的影响,仿真结果表明金属回线对于接地故障具有“改善”作用,同时,金属回线的接地点不同也会影响接地故障电流的大小;针对双极故障,研究了金属回线及直流电抗器对故障电流的“改善”作用,仿真结果表明,金属回线对于双极故障电流没有影响,而合适的直流电抗器可以改善直流故障电流,但过大的直流电抗器将会引起系统稳态运行时的周期性振荡。

参考文献:

- [1] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):8-17.
- [2] 喻锋,王西田,解大. 多端柔性直流下垂控制的功率参考值修正[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):117-122.
YU Feng, WANG Xitian, XIE Da. Power reference correction method for droop control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):117-122.
- [3] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):64-73.
- [4] 傅峡舟,徐政,易潇然. 多端直流输电系统主回路稳态参数计算[J]. 电网技术,2015,39(3):698-704.
FU Xiazhou, XU Zheng, YI Xiaoran. Calculation of main circuit steady state parameters for MTDC transmission system[J]. Power System Technology, 2015, 39(3):698-704.
- [5] 任敬国,李可军,牛林,等. 基于附加信号的 VSC-HVDC 系统改进有功功率控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):46-51.
REN Jingguo, LI Kejun, NIU Lin, et al. Advanced active power control strategy based on additional signal for VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7):46-51.
- [6] 徐殿国,刘瑜超,武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报,2015,30(17):1-12.
XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17):1-12.
- [7] 彭克,张新慧,陈羽. 适用于多端柔性互联的交直流配电网潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):22-27.
PENG Ke, ZHANG Xinhui, CHEN Yu. Power flow calculation algorithm for AC-DC hybrid distribution network with multi-terminal flexible interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):22-27.
- [8] 杨文博,宋强,朱喆,等. 基于直流内电势控制的 MMC 多端直流输电系统最优下垂控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):51-59.
YANG Wenbo, SONG Qiang, ZHU Zhe, et al. Optimal droop control based on direct DC internal potential control for MMC-MTDC

- system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 51-59.
- [9] YAZDIS S H, FATHI S H, FATHI S H, et al. Optimal operation of multi terminal HVDC links connected to offshore wind farms[C]// 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTICON). Nakhon Ratchasima, Thailand; IEEE, 2014; 1-6.
- [10] PRIETO-ARAUJO E, BIANCHI F D, JUNYENT-FERRÉ A, et al. Methodology for droop control dynamic analysis of multiterminal VSC-HVDC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2476-2485.
- [11] 仇雪娜, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 140-145.
- ZHANG Xuena, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A control and protection scheme of multiterminal DC transmission system based on MMC for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 140-145.
- [12] 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[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1919-1929.
- [13] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器的快速电磁暂态仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 36-40.
- GUAN Minyuan, XU Zheng. Fast electro-magnetic transient simulation method for modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 36-40.
- [14] TEEUWSEN S P. Simplified dynamic model of a voltage-sourced converter with modular multilevel converter design[C]// Power System Conference & Exposition. Seattle, WA, USA; IEEE, 2009: 1-6.
- [15] GNANARATHNAU 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.
- [16] 李笑倩. 基于 MMC 的高压大容量柔性直流输电关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- LI Xiaolian. Research on the key technologies of high voltage and high power HVDC based on MMC[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [17] XU J, ZHAO C, LIU W, et al. Accelerated model of modular multilevel converters in PSCAD/EMTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 129-136.
- [18] SAAD H, DENNETIÈRE S, MAHSEREDJIAN J, et al. Modular multilevel converter models for electromagnetic transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1481-1489.
- [19] AHMED N, ANGQUIST L, NORRGA S, et al. A computationally efficient continuous model for the modular multilevel converter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1139-1148.
- [20] LIU Sheng, XU Zheng, HUA Wen, 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.

作者简介:



孙谦浩

孙谦浩(1993—),男,山西运城人,博士研究生,主要研究方向为直流输配电及其关键换流器技术(E-mail: sxsunqianhao@163.com);

李亚楼(1974—),男,河南许昌人,教授级高级工程师,博士研究生导师,博士,主要研究方向为交直流电力系统及其关键设备建模、仿真与分析;

宋强(1975—),男,吉林长春人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为柔性直流输配电技术和大功率电力电子技术。

Application of MMC model based on arm fundamental wave average switching function in DC grid simulation

SUN Qianhao¹, LI Yalou², SONG Qiang¹, ZUO Peng³, WANG Yu¹, MENG Jingwei¹, MU Qing²

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: MMC (Modular Multilevel Converter) model plays a vital role for DC power grid, so a MMC behavior model based on the arm fundamental wave average switching function is proposed. Compared with the existing MMC model using the arm as the basic modeling unit, the proposed model combines unlock state and lock state of MMC as a whole, and the main circuit only includes the controlled voltage source, constant resistor and diodes and other static components, so this model can be completed in the existing simulation software without recoding and the numerical calculation. At the same time, the average switching function of the arm can be obtained directly from the control system without passing through the modulation system in the proposed model, thus the construction and debugging of the whole model are simplified. Compared with the detailed model through experiment, the accuracy and rapidity of the proposed model are verified. Then the DC fault characteristics of four-terminal metallic return grounding double-pole DC ring network are simulated and analyzed based on the proposed model. The simulative results show that the impedance of the metallic return and the location and impedance of grounding electrode may affect the grounding fault current, while have no influence on the bipolar fault current. The DC reactor has an "improvement" effect on the bipolar fault, but the "improvement" effect is less obvious with the increase of DC reactor value.

Key words: arm fundamental wave average switching function; DC grid; MMC behavior model; electromagnetic transient modeling; DC fault; metal return line