

可控电网换相换流器的电磁暂态简化建模方法

陈浩¹, 李建华¹, 黄志光¹, 庞博涵², 连攀杰², 许克², 刘文焯², 郁舒雁²

(1. 国家电网有限公司华东分部, 上海市 浦东新区 200120;
2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Simplified Modeling Method for Controllable Line-commutated Converters in Electromagnetic Transients Simulation

CHEN Hao¹, LI Jianhua¹, HUANG Zhiguang¹, PANG Bohan², LIAN Panjie², XU Ke², LIU Wenzhuo², YU Shuyan²

(1. East Branch of State Grid Corporation of China, Pudong New Area, Shanghai 200120, China;
2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: This paper presents a simplified modeling method for controllable line-commutated converters (CLCC) in electromagnetic transients (EMT) simulation. The CLCC combines fully controllable and semi-controllable devices and actively interrupts arm current during AC faults to prevent commutation failure. However, the detailed CLCC model, constructed using discrete components, must improve its efficiency in EMT simulations. A simplified modeling method is proposed to address this issue. The method is based on the switch logic and arm current conduction path of CLCC, simplifying the CLCC arm to include only one IGBT switch and one surge arrester, thereby reducing the simulation scale. Simulation results demonstrate that the simplified model achieves a significant 10-fold speedup compared to the detailed model while maintaining high accuracy. This notable enhancement greatly improves the efficiency of simulation research. Furthermore, the analysis confirms that the proposed simplified model retains the external characteristics of the arm, making it suitable for harmonic analysis, controller strategy verification, and research on external faults of the CLCC arm.

KEY WORDS: controllable line commutated converter (CLCC); electromagnetic transients (EMT); equivalent modeling; simplified model

摘要: 该文提出了一种针对可控电网换相换流器(controllable line-commutated converter, CLCC)电磁暂态仿真的简化建模方法。CLCC 结合了全控和半控器件, 能够在交流故障期间主动关断桥臂电流, 避免换相失败。为解决使用分立元件构建的 CLCC 详细模型在电磁暂态仿真中效率低下的问题, 提出了一种简化建模方法。该方法基于 CLCC 的开关逻辑和桥臂电流导通路径, 将 CLCC 桥臂简化为仅包含一个绝缘栅双极晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)和一个避雷器, 从而减小了仿真规模。仿真结果表明, 在保持精度的同时, 简化模型的仿真速度相较于详细模型提升了约 10 倍, 显著提高了仿真研究的效率。分析表明, 所

提出的简化模型保留了桥臂的外部特性, 适用于谐波分析、控制器策略验证以及 CLCC 桥臂外部故障的研究。

关键词: 可控电网换相换流器; 电磁暂态; 等效建模; 简化模型

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1136

0 引言

传统基于晶闸管的电网换相换流器(line-commutated converter, LCC)高压直流输电系统具有长距离大容量传输和有功功率快速可控等显著优点。然而, 由于晶闸管是半控型器件, 它需要依赖交流系统来提供足够的反向电压以恢复其阻断能力。当交流系统发生故障时, LCC 容易发生换相失败, 导致直流电流短时间内激增, 从而大幅度降低直流功率输出。在严重情况下, 这可能导致多个站点的连锁换相失败^[1-2]。为了完全避免常规直流输电系统中的换相失败问题, 文献[3-4]提出了一种基于全控型绝缘栅双极晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)和半控型晶闸管混联的可控电网换相换流器(controllable line-commutated converter, CLCC)拓扑结构。CLCC 继承了 LCC 和电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的优势, 不仅具有可控关断能力来避免换相失败, 而且具有 LCC 容量大、成本低的优点。在 2023 年, 国内首套 CLCC 应用于葛洲坝-南桥直流输电工程的受端南桥换流站。

对 CLCC 高压直流输电(high-voltage direct current, HVDC)系统暂态特性的微秒级准确刻画, 依赖于电磁暂态(electromagnetic transients, EMT)仿真。电磁暂态模型的详细程度取决于应用目的。当换流器模型用于器件或设备级分析时, 需要一个

较为详细的模型。然而，当换流器模型应用于系统级的仿真，则更关心换流器/桥臂的外部特性并追求更高的仿真效率，这就需要对模型进行适当的简化。

基于分立元件搭建的详细模型能够对 CLCC 各种运行状态进行准确 EMT 仿真，但面临仿真效率低下的问题。详细模型效率低下的原因主要有以下几点：1) 相比于 LCC，CLCC 的节点数和支路数明显增加，导致网络方程的阶数增加。2) CLCC 单个桥臂的主开关数量为 4 个(两个晶闸管，两个 IGBT 反并联二极管)，开关器件增加导致系统电导矩阵 LU 分解次数增加^[5]。此外，由于晶闸管、二极管等器件的状态是由满足某些条件的系统状态(状态事件)隐式地确定，因此与全控性器件相比，开关逻辑更为复杂，通常需要多次迭代才能确定开关状态组合的收敛解^[6]。3) CLCC 还包含避雷器这类复杂的非线性元件。为了对这种非线性元件进行 EMT 仿真，必须在每个时步求解一个电阻性非线性电路。一般情况下，求解非线性电路需要进行迭代计算，且容易出现收敛问题^[7]。

目前，对于 CLCC 简化提速建模方法的研究还较为有限。从现有的 LCC、VSC 等换流器的建模方法来看，平均值模型^[8-9]和动态相量模型^[10-11]存在较大的谐波截断误差，难以满足精度要求。此外，CLCC 在交流侧发生故障时工作在强迫换相运行模式。在该模式下，辅助支路的 IGBT 阀关断后，桥臂电流会被转移到辅助支路的避雷器上。针对换流器外部特性建模的平均值模型和动态相量模型难以对上述强迫换相过程进行准确模拟。戴维南等效模型根据嵌套快速同时求解算法的原理对换流器的子模块或桥臂内部节点进行消去，仅保留外部节点参与外部电网仿真，该模型在模块化多电平换流器和电力电子变压器上已取得显著的提速效果^[12-13]。然而，由于 CLCC 桥臂内部拓扑结构复杂，不具有子电路串联/级联特征，并且无法列出类似于半桥或全桥电路的开关状态表，这导致了戴维南等效电路的反解过程较为复杂，最终提速效果有限。

为了解决 CLCC 详细模型在电磁暂态仿真中效率低下的问题，本文提出了一种 CLCC 简化建模方法。该方法基于 CLCC 的开关逻辑和桥臂电流导通路径，对 CLCC 桥臂进行简化。在该简化模型中，CLCC 桥臂在自然换相阶段被简化为仅包含一个 IGBT 支路，而在强迫换相阶段被简化为一个 IGBT 支路与一个避雷器支路并联的形式。在 PSMModel 平台上构建了 CLCC 高压直流输电系统算例，对所提模型进行了仿真精度和效率的验证。

1 可控电网换相换流器拓扑及阀控模式

图 1 为 CLCC 详细模型的基本拓扑结构。文献[3-4]对 CLCC 的拓扑原理和控制系统进行了介绍。为了方便说明所提出的简化模型，这里简要描述 CLCC 详细模型的拓扑和阀控模式。

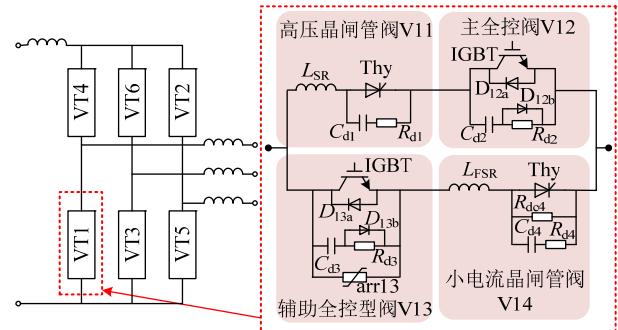


图 1 CLCC 详细模型拓扑
Fig. 1 Topology of the CLCC detailed model

CLCC 中每个桥臂(VT1—VT6)由主支路和辅助支路并联组成，2 条支路均由晶闸管阀和 IGBT 阀串联构成，且晶闸管元件与 IGBT 元件分别并联 RC 阻尼和 RCD 阻尼回路用以动态均压。值得注意的是，实际的 CLCC 设备中，V11—V14 都是由多个同型号的器件串联组成，以满足实际工程的耐压和通流要求^[3]。在仿真中，由于每个阀器件承受的电压和流过的电流都是一致的，一般会将多个串联的器件视为一个整体。主晶闸管阀 V11 具有与传统 LCC 中的晶闸管阀相同的作用。全控阀 V12 的功能是在桥臂换相期间关断主支路，将主支路电流转移到辅助支路，以此增加晶闸管关断时间使其可靠恢复。辅助支路 IGBT 用于切断桥臂电流确保桥臂完成换相。

CLCC 的可控换流模式包括正常运行和交流故障强迫换相运行，这两种模式的开关信号时序分别如图 2 和图 3 所示。其中，CP 是极控下发的控制脉冲，Sg11—Sg14 对应阀 V11—V14 的开关信号。开关信号时序原理如下：

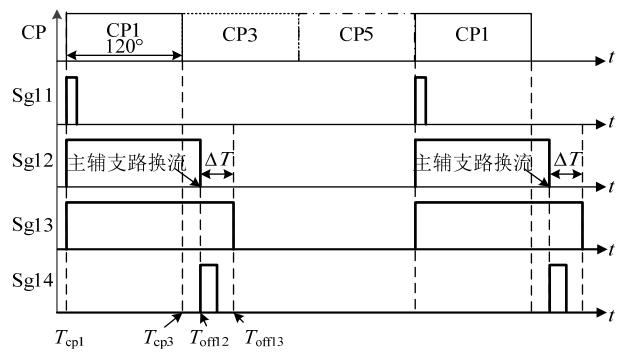


图 2 CLCC 详细模型开关信号时序(正常运行)
Fig. 2 Switching signal sequence of CLCC detailed model (normal operation)

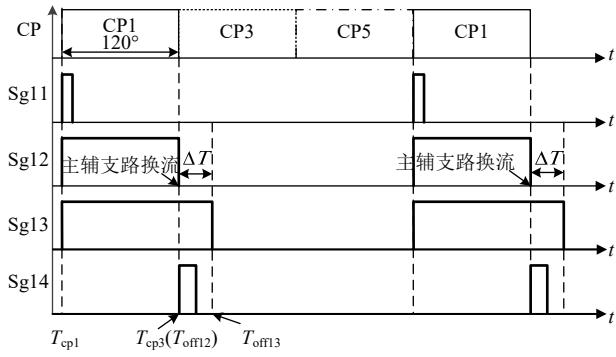


图 3 CLCC 详细模型开关信号时序(强迫换相)

Fig. 3 Switching signal sequence of CLCC detailed model (forced commutation)

1) 主支路流通阶段: 对应图 2 和图 3 的 T_{cp1} 时刻至 T_{cp3} 时刻。 T_{cp1} 时刻, V11 阀和 V12 阀同时导通。经过 120° 后的 T_{cp3} 时刻, 桥臂开始换相。

2) 桥臂换相阶段(自然换相): 根据图 2, 在桥臂换相期间的 T_{off12} 时刻(当主支路电流下降至某一参考值时), V12 关断, V14 开通, 较小的主支路电流开始向辅助支路转移。在 V12 关断时刻的指定延时 ΔT 后的 T_{off13} 时刻, V13 关断。

3) 桥臂换相阶段(强迫换相): 根据图 3, 当发生交流侧故障时, 桥臂电流不能完成自然换相, 需将 V12 关断时刻前移, 以缩短桥臂导通时间, 同时确保 V11 有足够关断时间。 T_{cp3} 时刻, V12 关断, V14 开通。在 V12 关断时刻的指定延时 ΔT 后的 T_{off13} 时刻, V13 关断。V13 关断后, 辅助支路电流转移至辅助支路避雷器 arr13。

2 所提 CLCC 简化模型

简化模型主要目的是执行系统级仿真, 所以主要关注 CLCC 桥臂的外部特性, 而不详细解析桥臂内部的器件级过渡过程。在此场景下, 为了简化分析, 可以暂时忽略 RC 阻尼回路和 RCD 阻尼回路, 因为它们主要用来实现动态均压和平滑开关过渡过程。在仿真中, 多个串联的阀已被组合为一个整体, 动态均压的问题已经不存在。省略阻尼回路后的 CLCC 桥臂的详细模型等效电路如图 4 所示。

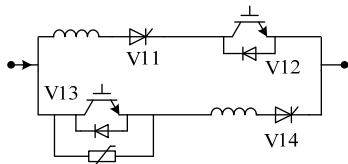


图 4 CLCC 桥臂等效电路

Fig. 4 Arm equivalent circuit of CLCC

CLCC 本质上属于 6 脉动桥相控电流源型换流器, 其直流侧由于大电感的存在, 可近似看成直流电流源, 直流回路呈现高阻抗。因此, 基于图 4 桥

臂等效电路, 通过分析直流电流在 CLCC 桥臂中的流动路径来进一步简化模型是合理的。

2.1 CLCC 简化模型拓扑及参数

图 5 为所提 CLCC 换流器简化模型拓扑。该拓扑包含两个理想开关 S_1 (单刀双掷开关)和 S_2 、晶闸管 Thy、IGBT、避雷器 arrs、电抗器 L_{SR} 。开关器件上并联了 RC 阻尼回路, 作为桥臂开关的等效阻尼回路。由于 Thy 和 IGBT 主要承受和 V11 阀相同的换相过电压, 故该等效阻尼回路的参数取与 V11 阀阻尼回路相同的参数即可。避雷器 arrs 上并联了 RCD 阻尼回路, 模拟详细模型中 arr13 的阻尼回路。简化模型拓扑的具体原理如下。

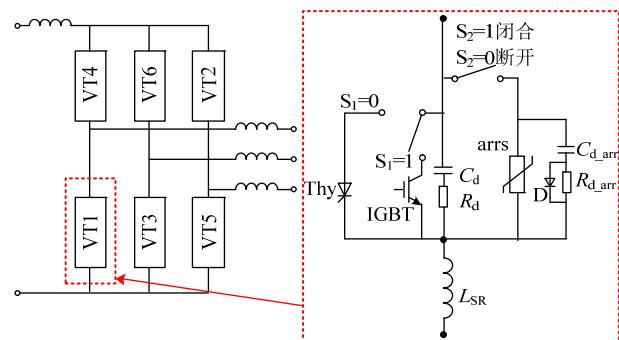


图 5 CLCC 简化模型拓扑

Fig. 5 Topology of the CLCC simplified model

2.1.1 简化模型处于 LCC 模式

简化模型处于 LCC 模式时, 桥臂拓扑如图 6 所示。该模式下, $S_1=0$, $S_2=0$ 。桥臂等效为一个晶闸管串联一个电抗器, 这与传统 LCC 拓扑结构相同。

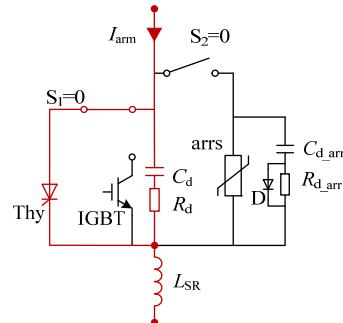


图 6 LCC 模式桥臂拓扑

Fig. 6 Arm topology in LCC mode

在简化模型 LCC 模式下, 开关控制逻辑与常规 LCC 完全相同, 晶闸管开关信号 Thy 与详细模型高压晶闸管阀控制信号 Sg11 相同。LCC 模式开关信号时序逻辑如图 7 所示。

2.1.2 简化模型处于 CLCC 正常运行模式

当简化模型处于 CLCC 正常运行模式时, 桥臂的拓扑如图 8 所示。该模式下, $S_1=1$, $S_2=0$ 。简化模型将详细模型的主支路和辅助支路进行了合并, 桥臂等效为一个 IGBT 与一个电抗器串联。

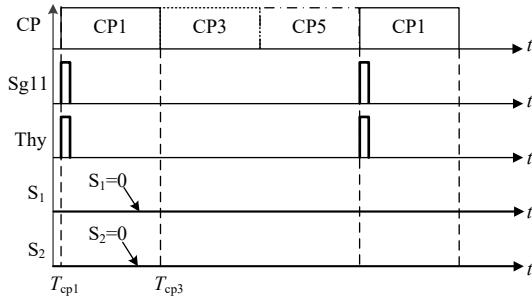


图 7 LCC 模式开关信号时序
Fig. 7 Switching signal sequence in LCC mode

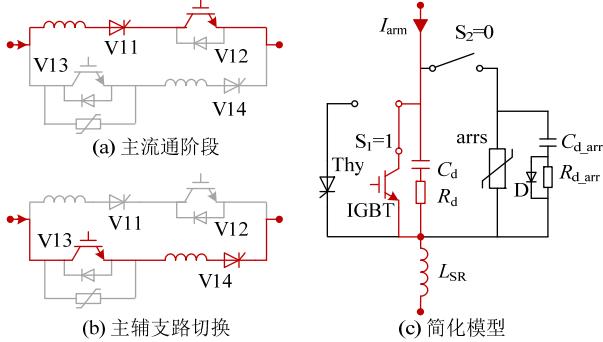


图 8 正常运行模式桥臂拓扑
Fig. 8 Arm topology in normal operation mode

在主流通阶段，直流电流通过详细模型主支路的 V11 阀和 V12 阀，如图 8(a)所示。在简化模型中，这个过程等效于 IGBT 的导通，而 IGBT 的导通电阻(即桥臂的导通电阻)为可以近似为详细模型中 V11 阀和 V12 阀的导通电阻之和：

$$R_{on_igbt} = R_{onV11} + R_{onV12} \quad (1)$$

其中： R_{on_igbt} 是简化模型 IGBT 的导通电阻； R_{onV11} 和 R_{onV12} 分别是详细模型 V11 阀和 V12 阀的导通电阻。

在主辅支路切换阶段，V12 阀关断，直流电流从主支路转移至辅助支路，直流电流通过详细模型辅助支路的 V13 阀和 V14 阀，如图 8(b)所示。在这个阶段，主桥臂仍然处于通流状态，因此简化模型中的 IGBT 保持导通，不会对桥臂电压和桥臂总电流产生影响。由于辅助支路的电流峰值和通流时间相对主支路较小，因此为避免在仿真中频繁切换 IGBT 阻值导致桥臂电导矩阵元素改变，可以让主流通阶段和主辅支路切换阶段中的 IGBT 的导通电阻保持不变：

$$R_{on_igbt} = R_{onV13} + R_{onV14} \approx R_{onV11} + R_{onV12} \quad (2)$$

CLCC 正常运行模式开关信号时序逻辑如图 9 所示。

1) T_{cp1} 时刻，阀控接收到极控下发的桥臂 1 触发命令(CP1 信号)后，触发 IGBT 导通信号(与 Sg11 信号同时开始触发)，此时 IGBT 支路通流，该阶段对应于详细模型的主支路通流阶段。

2) CP1 信号下达约 120° (6.67ms)后的 T_{cp3} 时刻，

阀控接收到桥臂 3 触发信号 CP3，桥臂 1 开始向桥臂 3 换相。 T_{cp3} 时刻后的一段时间内，通过比较桥臂电流 I_{arm} 与关断电流设置值 I_{off} 的大小关系，确定 IGBT 的关断时刻 T_{off} 。当桥臂电流 I_{arm} 小于关断电流设置值 I_{off} 时，触发 IGBT 关断。关断电流设置值 I_{off} 选取一个较小值(如 20A)即可。

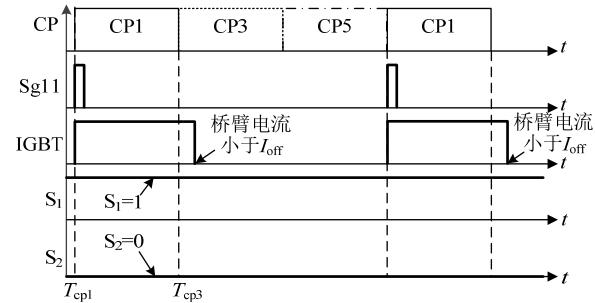


图 9 正常运行模式开关信号时序
Fig. 9 Switching signal sequence in normal operation mode

2.1.3 简化模型处于 CLCC 强迫换相运行模式

当简化模型运行在 CLCC 强迫换相运行模式时，桥臂的拓扑如图 10 所示。该模式下， $S_1=1$ ， S_2 的逻辑可见图 11。

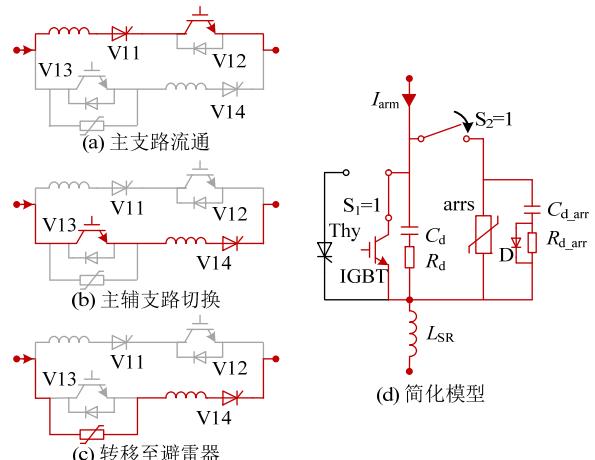


图 10 强迫换相运行模式桥臂拓扑
Fig. 10 Arm topology in forced commutation mode

当发生交流侧故障时，CLCC 进入强迫换相运行模式。 T_{CP1} 时刻至 T_{CP3} 时刻，详细模型处于主流通阶段，这与正常运行模式相同，如图 10(a)所示。换相期间的 T_{CP3} 时刻(CP 信号下达后约 120°)，详细模型主支路 V12 阀关断，进入主辅支路切换阶段，如图 10(b)所示。该阶段桥臂仍然处于通流状态，因此简化模型中的 IGBT 保持导通。 T_{off13} 时刻(V13 关断时刻)，详细模型辅助支路 V13 阀关断，桥臂电流转移至 V13 阀并联的避雷器 arr13 中，如图 10(c)所示。此时对应简化模型 IGBT 关断，同时 S_2 闭合，桥臂电流转移至避雷器 arrs 中。由于 V14 的导通电阻远小于 arr13 的等效电阻，因此可以设定简化模型中的 arr 的伏安特性曲线与详细模型中

的 arr13 的伏安特性曲线一致:

$$U_{\text{arr}} = IR_{\text{onV14}} + U_{\text{arr13}}(I) \approx U_{\text{arr13}}(I) \quad (3)$$

其中; I 是通过 arr13 和 V14 的电流; U_{arr} 是 arr 的电压; R_{onV14} 是 V_{14} 的导通电阻; $U_{\text{arr13}}(I)$ 是 arr13 的伏安特性。

简化模型 CLCC 强迫换相运行模式开关信号时序如图 11 所示。

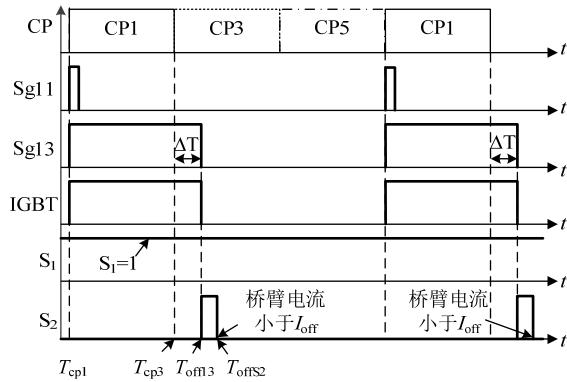


图 11 强迫换相运行模式开关信号时序

Fig. 11 Switching signal sequence in forced commutation mode

1) $T_{\text{cp}1}$ 时刻, 阀控接收到极控下发的桥臂 1 触发命令(CP1 信号)后, 同时触发 V11、IGBT 导通。

2) CP1 信号下达后约 120° (6.67ms)的 $T_{\text{cp}3}$ 时刻, 阀控接收到桥臂 3 触发信号 CP3, 桥臂 1 开始向桥臂 3 换相。

3) $T_{\text{off}1}$ 时刻, 触发 IGBT 关断信号, 同时触发 S_2 闭合信号, 其中 $T_{\text{off}13} = T_{\text{cp}3} + \Delta T$ 。

4) 阀控监控桥臂电流 I_{arm} 与关断电流设置值 I_{off} 的大小, 当桥臂电流 I_{arm} 小于关断电流设置值 I_{off} 的 $T_{\text{off}S2}$ 时刻, 触发 S_2 断开信号。

2.2 CLCC 简化模型诺顿等值电路

PSModel 采用了电磁暂态分析程序 (electromagnetic transients program, EMTP) 算法计算网络方程, 在每个离散时间点上, 元件模型需要被转化为诺顿等值电路(也称为离散化伴随电路)^[5]。通过将诺顿等值电路的电导矩阵和节点注入电流列向量叠加到系统网络方程中, 参与系统网络方程的求解过程。

CLCC 简化模型桥臂的诺顿等值电路如图 12 所示。该诺顿等值电路的建模思路如下:

1) 在 CLCC 系统级仿真中, 通常关注桥臂端口或换流器端口的输出波形, 而不关心电力电子开关的器件级输出波形^[14]。因此, 对于电力电子开关, 可以采用二值电阻模型(导通时等效为小电阻, 关断时等效为大电阻)。这种模型结构简单, 同时考虑了开关损耗。

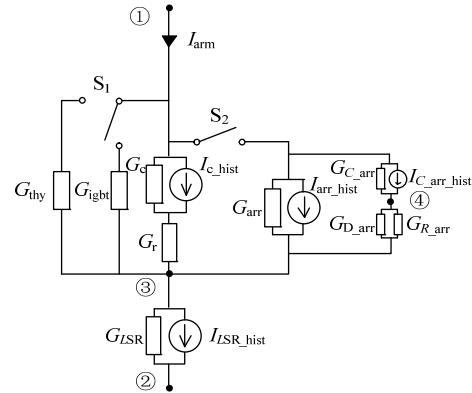


图 12 简化模型诺顿等值电路

Fig. 12 Norton equivalent circuit of the simplified model

2) 简化模型中的储能元件电容和电感将根据 EMTP 类方法处理, 其中电容和电感的微分方程通过数值积分方法转化为差分方程, 在离散时间点上等效为如图 13 所示的电导并联历史电源的形式。根据所采用的数值积分方法的不同, 电导和历史电流源的公式也会有所差异。有关这种方法已经有很多文献进行了阐述^[5], 在此不再赘述。

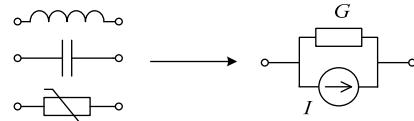


图 13 储能元件和非线性电阻及其诺顿等值电路

Fig. 13 Energy storage elements, nonlinear resistors, and their Norton equivalent circuits

3) 避雷器通常可以用分段线性电阻来模拟, 分段线性电阻在某个区段可以被如图 13 所示的电导与电流源并联的电路替代, 其中电导 G 和电流源 I 分别表示伏安特性曲线中当前工作区段的斜率和截距。

当非线性电阻电路中的所有非线性电阻都能够通过单调递增的伏安特性曲线进行描述时, 电路的解具有唯一性^[15]。这个特性适用于简化模型中的二值电阻开关和分段线性电阻描述的避雷器。求解分段线性电阻电路的通用流程如下: 根据之前计算得到的电压或电流, 确定非线性元件的工作区段, 并从伏安特性曲线中获取 G 和 I 的值。更新网络方程并求解, 反复迭代上述过程, 直到电压或电流收敛到电路的解。

上述求解分段线性电阻电路的流程本质上采用了传统 Newton-Raphson(NR) 法。需要注意的是, 尽管传统 NR 法具有快速收敛的特点, 但它并非全局收敛算法, 使用不合适的初始值可能导致电路解进入循环轨迹并最终陷入死循环。为了解决这个问题, 可以综合应用双轴 NR 法、循环轨迹检测法和 Katzenelson 法等方法^[6-7], 以避免陷入死循环并获

得正确的收敛解。

为了进一步提高仿真效率，可以分别将 RC 电路和 RCD 电路的诺顿等值电路合并，从而降低等值电路节点数。此外，考虑到简化模型中晶闸管 Thy 和 IGBT 的导通和关断电阻相同，二者仅在开关逻辑上有所不同。因此，如果是自行编程实现简化模型，可以将晶闸管 Thy 和 IGBT 合并为一个多模态开关 MSW。根据 S_1 的值，MSW 可以在晶闸管开关逻辑和 IGBT 开关逻辑之间进行切换。简化模型的最终诺顿等值电路如图 14 所示。最终诺顿等值电路对应的节点电导矩阵和节点注入电流列向量分别由式(4)和式(5)给出。

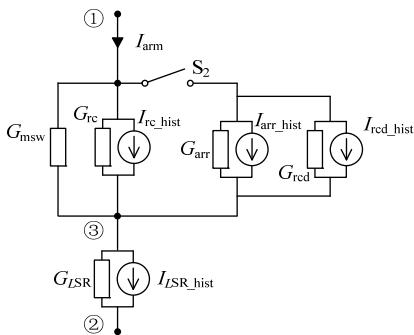


图 14 简化模型最终诺顿等值电路

Fig. 14 Final Norton equivalent circuit of the simplified model

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

节点电导矩阵中元素计算式为

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{11} = G_{\text{msw}} + G_{\text{rc}} + S_2(G_{\text{arr}} + G_{\text{rcd}}) \\ y_{12} = y_{21} = 0 \\ y_{13} = y_{31} = -G_{\text{msw}} - G_{\text{rc}} - S_2(G_{\text{arr}} + G_{\text{rcd}}) \\ y_{22} = G_{\text{LSR}} \\ y_{23} = y_{32} = -G_{\text{LSR}} \\ y_{33} = G_{\text{msw}} + G_{\text{rc}} + S_2(G_{\text{arr}} + G_{\text{rcd}}) + G_{\text{LSR}} \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} -I_{\text{rc_hist}} - S_2(I_{\text{arr_hist}} + I_{\text{rcd_hist}}) \\ I_{\text{LSR_hist}} \\ -I_{\text{LSR_hist}} + I_{\text{rc_hist}} + S_2(I_{\text{arr_hist}} + I_{\text{rcd_hist}}) \end{bmatrix}$$

3 仿真验证

PSModel(Power System Model)是中国电力科学研究院开发的电磁暂态仿真程序，该程序使用了多步变步长仿真算法^[12,16-17]，具备大电网全电磁暂态仿真能力。为了验证所提模型的有效性，按照葛南直流工程接线方式，在 PSModel 中构建了一个双极±500kV/1200MW LCC-CLCC 直流输电测试系统，如附录图 A1 所示。其中，单极采用 12 脉动换

流单元，整流侧采用 LCC，逆变侧采用 CLCC。稳态时，送端采用定直流电流控制，受端采用定直流电压控制。所提 CLCC 简化模型通过编程在 PSModel 程序中实现。CLCC 详细模型则在 PSModel 中通过分立元件搭建实现，并以该详细模型仿真结果作为参照。硬件配置为：英特尔酷睿 i9-12900H 处理器，14 核心，睿频频率 3.8 至 5.0 GHz；16 GB RAM；Win11 操作系统。

3.1 仿真精度分析

本节采用 2-范数相对误差来量化所提模型相对于详细模型的误差。2-范数相对误差的公式^[18]如下：

$$\varepsilon(\mathbf{x}) = \frac{\|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}\|_2}{\|\hat{\mathbf{x}}\|_2} \times 100\% \quad (6)$$

其中： \mathbf{x} 是所提简化模型的计算结果向量； $\hat{\mathbf{x}}$ 是详细模型的计算结果向量； $\|\mathbf{x}\|_2$ 表示向量 \mathbf{x} 的 2-范数。

3.1.1 稳态运行分析

正极桥 1 CLCC 正常运行模式下的稳态波形如图 15，从上到下包括 A 相交流电流、直流侧电压，VT1 阀桥臂电流和 VT1 阀桥臂电压。其中，蓝色实线是详细模型，橙色虚线是简化模型，仿真步长均为 20μs。由图 15 可知，正常运行模式下，CLCC 的稳态运行工况与传统 LCC 基本相同。由波形对比可以看出，本文提出的简化模型与详细模型波形吻合度很高。经计算，图 15 所示的 4 个波形的 2-范数相对误差分别为 0.66%，0.46%，0.67% 和 0.79%，验证了所提模型的准确性。CLCC 交流电流和直流电压稳态波形的频谱图如图 16 所示，简化模型的频谱与详细模型的频谱在主要谐波频率点差异很小，表明简化模型能够准确模拟 CLCC 的谐波特性。

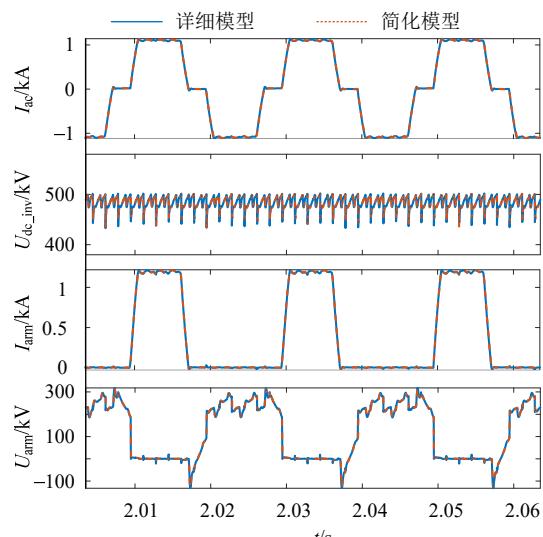


图 15 稳态波形对比
Fig. 15 Waveform comparison in steady state

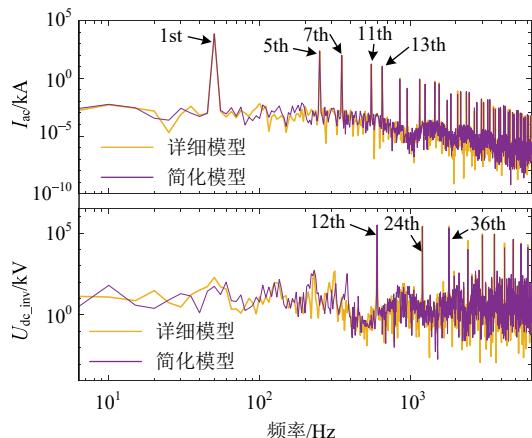


图 16 稳态波形频谱图

Fig. 16 Frequency spectra of steady-state waveform

3.1.2 逆变侧交流系统单相接地短路故障分析

在 $t=2.1\text{s}$ 时刻, 逆变侧交流系统 220kV 线路发生 A 相金属性接地故障, 故障持续 0.1s 后清除, 系统逐渐恢复。故障期间的 CLCC 的 A 相交流电流、直流线路电压, VT1 阀桥臂电流、VT1 阀桥臂电压的波形对比如图 17 所示。故障期间的单极直流功率, 交流侧有功和无功功率波形对比如附录图 B1 所示。

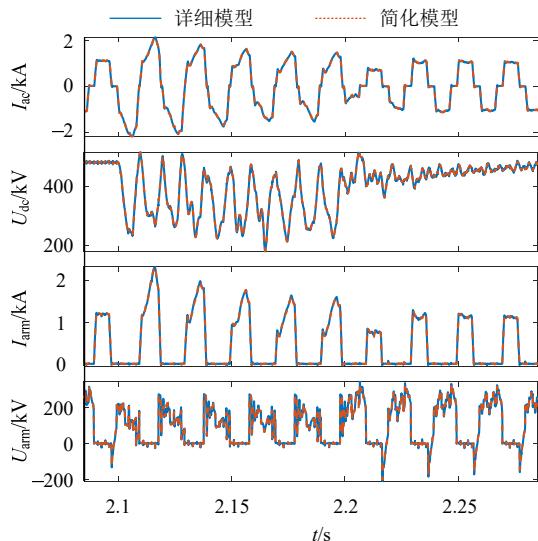


图 17 逆变侧交流系统单相接地故障波形对比

Fig. 17 Waveform comparison of single-phase ground fault in inverter ac side

故障期间, 逆变侧交流电压降低, 换流阀桥臂电流迅速增大, CLCC 在全控型开关 IGBT 的作用下, 桥臂电流能够成功换相, 可见 CLCC 在交流侧单相短路故障期间能够避免换相失败。同时, CLCC 处于 0 熄弧角运行, 消耗无功功率减少, 单极直流能够输出 300~400MW 的直流功率。

由图 17 和图 B1 可以看出, 2 种模型仿真结果基本吻合。经计算, 图 17 所示的 4 个波形的 2-范数相对误差分别为 1.39%, 1.37%, 1.43% 和 1.80%。

值得注意的是, 由于变量的阶跃和闭环积分器的影响, 相对误差在故障期间相对于稳态时有所增加, 但仍然在可接受范围内。

3.1.3 逆变侧交流系统三相接地短路故障分析

在 $t=2.1\text{s}$ 时刻, 逆变侧交流系统 220kV 线路发生三相金属性接地故障, 故障持续 0.1s 后清除, 系统逐渐恢复。故障期间的逆变侧 A 相交流电流、直流线路电压, VT1 阀桥臂电流、VT1 阀桥臂电压的波形对比如图 18 所示。故障期间的单极直流功率, 交流侧有功和无功功率波形对比如附录图 B2 所示。

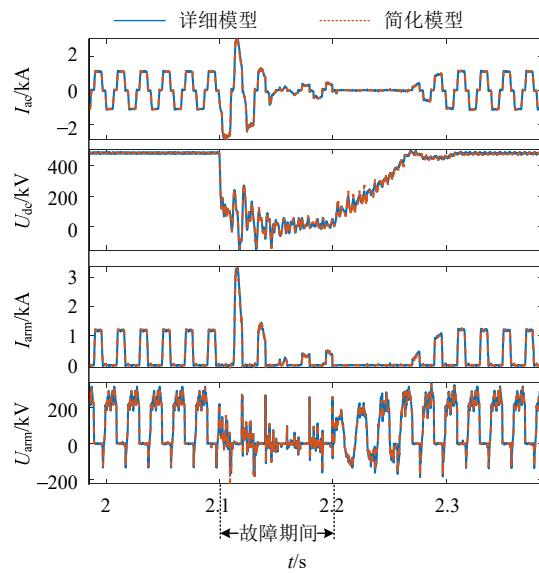


图 18 逆变侧交流系统三相接地故障波形对比

Fig. 18 Waveform comparison of three-phase ground fault in inverter ac side

图 18 与图 B2 的仿真结果表明, 在三相短路故障发生时, 借助于 IGBT, CLCC 仍然可以成功进行换相。然而, 由于故障期间交流电压降至零, CLCC 无法完成功率传输。两种模型波形吻合度良好。经计算, 图 18 所示的 4 个波形的 2-范数误差分别为 2.15%, 1.41%, 2.33% 和 2.78%。在三相故障的情况下, 由于波形向量的数值有更多的点趋近于 0, 使得式(6)的分母变小, 这可能导致相对误差看起来较大, 但实际上, 绝对误差与 3.1.2 节中的单相接地工况相差不大。

3.1.4 直流线路接地短路故障分析

在 $t=2.1\text{s}$ 时刻, 直流线路发生三相金属性接地故障, 故障持续 0.1s 后清除。故障期间的 VT1 阀桥臂电流、直流线路电压和直流功率波形对比如图 19 所示。

根据图 19 可知, 发生直流接地故障后, 逆变器桥臂电流、直流电压和直流功率都跌落至零。故障清除后, 系统迅速恢复, CLCC 与 LCC 响应

特性相似, 具备直流线路故障自清除能力。两种模型的波形结果差异很小。经计算, 图 19 所示的 3 个波形的 2-范数误差分别为 1.09%, 0.56% 和 0.99%。

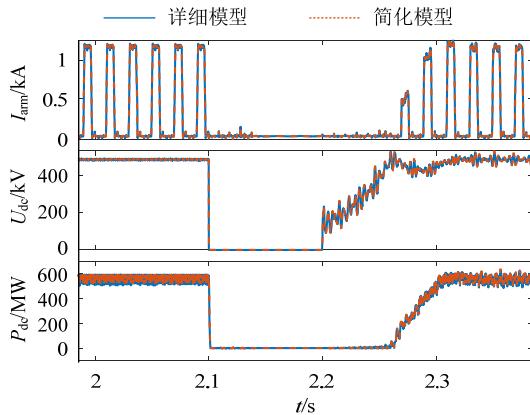


图 19 直流线路接地故障波形对比

Fig. 19 Waveform comparison of dc line ground fault

3.2 仿真效率分析

LCC 详细模型、CLCC 详细模型和所提 CLCC 简化模型的仿真规模对比如表 1 所示。由表 1 可知, 相较于详细模型, 所提模型在节点和开关数量上显著减少, 仿真规模与 LCC 详细模型相当。所提模型在 CLCC 正常运行模式下不包含避雷器支路, 避雷器支路仅在强迫运行模式下接入, 因此可以减少整体非线性元件的计算量。

表 1 仿真模型规模对比
Table 1 Simulation model scale comparison

模型	数量/个		
	节点	开关	逆变站总非线性元件
LCC 详细模型	5	6	24
CLCC 详细模型	53	36	168
CLCC 简化模型	11	6	正常运行: 24 强迫换相: 48

在 PSModel 仿真平台上, 以附录图 A1 所示 LCC-CLCC 直流输电测试系统为例, 采用 3.1.2 节故障工况。逆变侧分别建立了 LCC 详细模型、CLCC 详细模型和所提 CLCC 简化模型 3 种逆变器模型, 并采用不同的仿真步长进行测试和统计, 同时计算所提 CLCC 简化模型相对于 CLCC 详细模型的加速比, 结果如表 2 所示。

表 2 仿真计算时间对比
Table 2 Simulation calculation time comparison

步长/ μs	仿真 时间/s	不同逆变器模型的仿真耗时/s				加速比
		LCC 详细模型	CLCC 详细模型	CLCC 简化模型		
50	3.0	22	313	29	10.8	
20	3.0	39	575	49	11.7	
10	3.0	66	878	81	10.8	

从表 2 的结果可以看出, 相较于 LCC 详细模型, CLCC 详细模型需要更多的计算资源。然而, 所提出的简化模型能够显著降低仿真计算时间。在不同的时间步长下, 相对于详细模型, CLCC 简化模型提供了约 10 倍的加速比, 从而大幅提升了仿真效率, 接近 LCC 详细模型仿真效率水平。

3.3 仿真适用性分析

本节根据前面几节的结果, 讨论所提 CLCC 简化模型适用的电磁暂态仿真目的。

1) 谐波分析: 简化模型可以正确地模拟由 CLCC 引起的低次和高次谐波, 这一特性已在 3.1.1 节进行了验证。若关注电力系统谐波对 CLCC 的影响, 简化模型也是适用的。

2) 控制器策略验证: 简化模型保留了详细模型所有的控制器并反映了它们的动态过程。值得注意的是, 由 2.1 节可知, 简化模型的阀控信号是根据详细模型的阀控信号 Sg11 和 Sg13 生成的。由于简化模型将主辅支路进行了合并, 因此简化模型不含主辅支路切换的控制逻辑信息(即 Sg12 信号)。因此, 对于控制器策略验证的需求, 除了主辅支路切换逻辑的验证, 简化模型都是符合要求的。

3) CLCC 桥臂外部故障研究: 简化模型能够准确模拟 CLCC 换流阀桥臂外特性, 可以模拟因桥臂外部故障引起的系统电压跌落或三相不平衡条件下的电压和电流的动态过程。这一点在 3.1.2 至 3.1.4 节中对 CLCC 交直流侧故障仿真进行了验证。

4) CLCC 桥臂内部故障研究: 由于简化模型将主辅支路合并为一条支路, 无法直接进行桥臂内部故障的研究。为了解决这个问题, 可以将需要研究内部特性的桥臂替换为详细模型, 而其余桥臂保留为简化模型, 以此模拟桥臂内部故障特性的同时提高仿真效率。

4 结论

本文针对 CLCC 详细模型电磁暂态仿真效率低下问题, 提出了一种适用于系统级电磁暂态仿真的简化建模方法, 并对其在仿真的精度、效率和适用性进行了研究。

该简化模型基于 CLCC 的开关逻辑和桥臂电流导通路径, 对 CLCC 桥臂进行了简化。通过将 CLCC 桥臂等效为仅含一条 IGBT 支路和一条避雷器支路的并联结构, 大幅减少了节点数和开关数量, 使得仿真规模与 LCC 详细模型相当。在 PSModel 中基于葛-南直流接线方式搭建 LCC-CLCC 测试系统。仿真结果表明, 在稳态运行和 CLCC 交直流侧故障

工况下，该简化模型不仅保持了详细模型的精度，并且相较于详细模型具有约10倍的加速比，显著提升了仿真效率。

所提出的简化模型保留了桥臂外特性，可用于进行谐波分析、控制器策略验证以及CLCC桥臂外部故障的研究。对于桥臂内部故障的研究，可以采用混合模型的方法，结合简化模型和详细模型，以满足仿真需求并提高效率。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 李培平, 周泓宇, 姚伟, 等. 多馈入结构背景下的高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 834-850.
LI Peiping, ZHOU Hongyu, YAO Wei, et al. Review of commutation failure on HVDC transmission system under background of multi-infeed structure[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 834-850(in Chinese).
- [2] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 503-510.
LÜ Pengfei. Research on HVDC operation characteristics under influence of hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 503-510(in Chinese).
- [3] 高冲, 贺之渊, 杨俊, 等. 新型可控电网换相换流器拓扑及其控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1940-1949.
GAO Chong, HE Zhiyuan, YANG Jun, et al. A novel controllable line commutated converter topology and control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1940-1949(in Chinese).
- [4] GAO Chong, YANG Jun, HE Zhiyuan, et al. Novel controllable-line-commutated converter for eliminating commutation failures of LCC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 255-267.
- [5] WATSON N, ARRILLAGA J. Power systems electromagnetic transients simulation[M]. London: Institution of Electrical Engineers, 2003: 39.
- [6] CHUA L O, LIN P Y. Computer-aided analysis of electronic circuits: algorithms and computational techniques[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1975.
- [7] NODA T, KIKUMA T. A robust and efficient iterative scheme for the EMT simulations of nonlinear circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1030-1038.
- [8] BACHA S, MUNTEANU I, BRATCU A I. Power electronic converters modeling and control[M]. London: Springer, 2014.
- [9] HONG Zeqi, XU Yin, HE Jinghan, et al. Modified average-value model for high-performance fault transient simulation of AC-DC hybrid power networks[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(1): 95-109.
- [10] DARYABAK M, FILIZADEH S, JATSKEVICH J, et al. Modeling of LCC-HVDC systems using dynamic phasors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1989-1998.
- [11] BAGHERI-VANDAEI A, FILIZADEH S. Generalised extended-frequency dynamic phasor model of LCC-HVDC systems for electromagnetic transient simulations[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(12): 3061-3069.
- [12] 连攀杰, 刘文焯, 汤涌, 等. 模块化多电平换流器的高效电磁暂态仿真方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7980-7989.
LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, TANG Yong, et al. Research on efficient electromagnetic transient simulation method of modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7980-7989(in Chinese).
- [13] 许建中, 高晨祥, 丁江萍, 等. 高频隔离型电力电子变压器电磁暂态加速仿真方法与展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3466-3479.
XU Jianzhong, GAO Chenxiang, DING Jiangping, et al. Electromagnetic transient acceleration simulation methods and prospects of high-frequency isolated power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3466-3479(in Chinese).
- [14] 贺杨烊, 郑晓冬, 邝能灵, 等. 交直流混联电网 LCC-HVDC 换流器建模方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3119-3129.
HE Yangyang, ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, et al. A review of modeling methods for LCC-HVDC converter in AC/DC hybrid power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3119-3129(in Chinese).
- [15] CHUA L O, DESOER C A, KUH E S. Linear and nonlinear circuits[M]. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [16] 刘文焯, 汤涌, 侯俊贤, 等. 考虑任意重事件发生的多步变步长电磁暂态仿真算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 9-15.
LIU Wenzhuo, TANG Yong, HOU Junxian, et al. Simulation algorithm for multi variable-step electromagnetic transient considering multiple events[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 9-15(in Chinese).
- [17] 连攀杰, 刘文焯, 杨泽栋, 等. 混合型 MMC 全状态高效电磁暂态仿真方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8520-8530.
LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, YANG Zedong, et al. Research on hybrid mmc full-state efficient electromagnetic transient simulation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8520-8530(in Chinese).
- [18] 夏越, 陈颖, 宋炎侃, 等. 基于自适应移频分析法的 Voltage-Behind-Reactance 异步电机多时间尺度暂态建模与仿真[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3872-3879.
XIA Yue, CHEN Ying, SONG Yankan, et al. Voltage-behind-reactance induction machine model for multi-timescale transient simulation[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3872-3879(in Chinese).



陈浩

在线出版日期: 2024-03-10。

收稿日期: 2023-06-25。

作者简介:

陈浩(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网运行与稳定分析, E-mail: chenhao@ec.sgcc.com.cn;

庞博涵(1997), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电磁暂态建模与仿真, E-mail:

pang_bohan@163.com;

连攀杰(1994), 男, 博士, 研究方向为电磁暂态建模与仿真。

(编辑 李健一)

附录 A

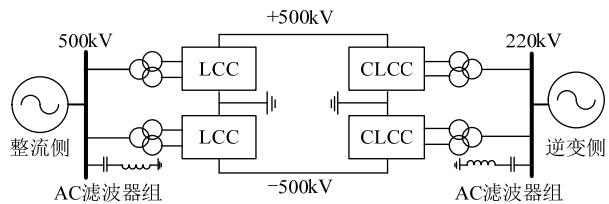


图 A1 LCC-CLCC 直流输电测试系统

Fig. A1 LCC-CLCC DC transmission test system

附录 B

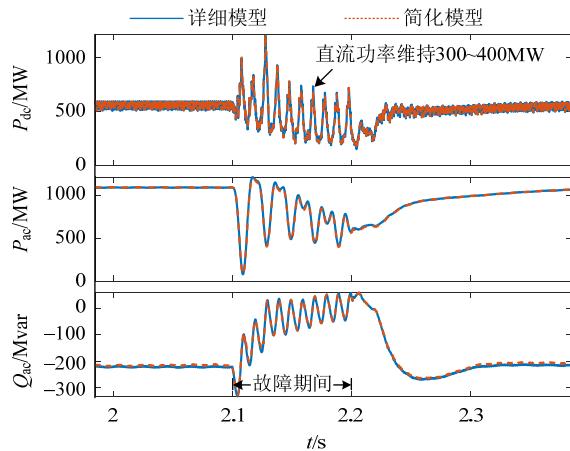


图 B1 单相接地故障期间功率波形对比

Fig. B1 Waveform comparison during single-phase ground fault

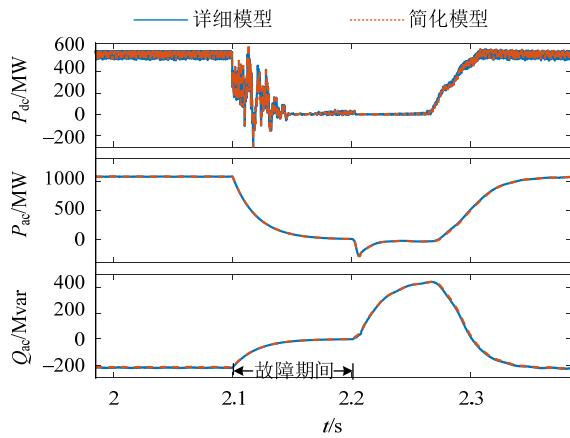


图 B2 三相接地故障期间功率波形对比

Fig. B2 Waveform comparison during three-phase ground fault