

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 10 月 4 日 (04.10.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/176599 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/00 (2006.01) *H02J 3/06* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/084529
- (22) 国际申请日: 2017 年 5 月 16 日 (16.05.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201710204912.4 2017 年 3 月 31 日 (31.03.2017) CN
- (71) 申请人: 全球能源互联网研究院有限公司 (GLOBAL ENERGY INTERCONNECTION RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) [CN/CN]; 中国北京市昌平区北七家未来科技城滨

河大道 18 号, Beijing 102211 (CN)。 国家电网公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。

- (72) 发明人: 刘栋 (LIU, Dong); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 寇龙泽 (KOU, Longze); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 庞辉 (PANG, Hui); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 贺之渊 (HE, Zhiyuan); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号, Beijing 102211 (CN)。 朱琳 (ZHU, Lin); 中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路 270 号,

(54) Title: MMC-BASED ELECTROMECHANICAL TRANSIENT SIMULATION METHOD AND SYSTEM FOR VOLTAGE SOURCE CONVERTER-BASED HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT AND DIRECT CURRENT POWER GRID

(54) 发明名称: 基于 MMC 的柔性直流及直流电网机电暂态仿真方法及系统

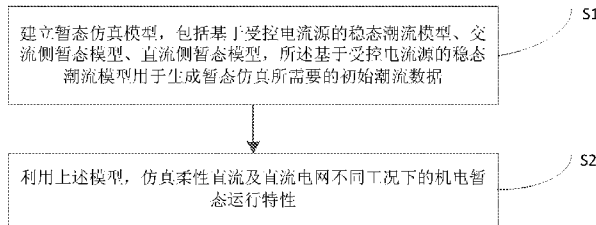


图 1

- S1 Establish a transient simulation model comprising a steady-state trend model based on a controlled current source, an alternating current transient model, and a direct current transient model; the steady-state trend model based on the controlled current source is employed to generate initial trend data required for a transient simulation
- S2 Simulate, by means of the aforementioned models, an electromechanical transient operation characteristic of a voltage source converter-based high voltage direct current and direct current power grid in different operation conditions

(57) Abstract: An MMC-based electromechanical transient simulation and modeling method and system for a voltage source converter-based high voltage direct current (VSC-HVDC) and direct current power grid. The method comprises: establishing a transient simulation model comprising a steady-state trend model based on a controlled current source, an alternating current transient model, and a direct current transient model, wherein the steady-state trend model based on the controlled current source is employed to generate initial trend data required for a transient simulation (S1); and simulating, by means of the transient simulation model, an electromechanical transient operation characteristic of a VSC-HVDC and direct current power grid in different operation conditions (S2). By not taking initial value computation of a direct current power grid into consideration, the method and system simplify the steady-state trend model without influencing accuracy and stability of transient simulation, and improve expandability of the model.

(57) 摘要: 一种基于 MMC 的柔性直流及直流电网机电暂态仿真建模方法及系统。该方法包括: 建立暂态仿真模型, 包括基于受控电流源的稳态潮流模型、交流侧暂态模型、直流侧暂态模型, 基于受控电流源的稳态潮流模型用于生成暂态仿真所需要的初始潮流数据 (S1); 利用暂态仿真模型, 仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性 (S2)。该方法及系统不考虑直流网络的初值计算, 在不影响暂态仿真精度和稳定性的前提下简化了稳态潮流模型, 并提高了模型的可扩展性。

Beijing 102211 (CN)。 吴学光 (WU, Xueguang);
中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺沙路
270号, Beijing 102211 (CN)。 林畅 (LIN, Chang);
中国北京市昌平区小汤山镇大东流村顺
沙路270号, Beijing 102211 (CN)。

(74) 代理人: 北京派特恩知识产权代理有限公司 (CHINA PAT INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE); 中国北京市海淀区海淀南路21号中关村知识产权大厦B座2层, Beijing 100080 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

基于 MMC 的柔性直流及直流电网机电暂态仿真方法及系统

技术领域

本发明涉及柔性直流输电的数字仿真技术，具体涉及一种基于 MMC 的柔性直流及直流电网机电暂态仿真方法及系统。

背景技术

电压源换流器型高压直流输电技术（Voltage Source Converter Based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC）拥有不存在换相失败、有功无功快速独立控制等优点，在大规模分布式可再生能源接入，异步电网互联等方面被认为是最有效的技术方案。VSC-HVDC 拥有不同的拓扑结构，其中模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter, MMC）以其开关频率低，谐波含量少和易扩展等特点成为了研究的热点，并实现了工程化的应用。

MMC 中含有数量众多的电力电子开关器件，适合利用电磁暂态仿真工具对其内部的动态过程和相应的控制策略进行仿真研究，例如桥臂环流控制和子模块电容电压平衡控制等。目前，相关文献已经提出了一些 MMC 的高效电磁暂态建模方法并获得了广泛应用。柔性直流或直流电网接入交流电网后会带来系统暂态稳定性的变化，在工程规划和设计之初就需要对交直流系统的相互作用和可能产生的稳定性问题进行深入研究。但是，由于目前计算机技术和仿真硬件资源的限制，电磁暂态仿真在进行大规模交直流电网仿真时必然需要对交流系统进行等值简化，这会导致交流系统模型的动态特性和实际电网存在差异，也会影响最终仿真结果的准确性。

发明内容

为解决上述现有技术中的不足，本发明的目的是提供一种基于 MMC 的柔性直流及直流电网机电暂态仿真方法及系统，本发明建立准确实用的柔性直流及直流电网机电暂态仿真模型，通过与实际电网运行数据进行联合仿真，可以得到较为准确的交直流电网暂态稳定结果。

本发明的目的是采用下述技术方案实现的：

本发明提供一种基于 MMC 换流器的柔性直流及直流电网机电暂态仿真方法，其改进之处在于，包括：

建立暂态仿真模型，包括基于受控电流源的稳态潮流模型、交流侧暂态模型、直流侧暂态模型，所述基于受控电流源的稳态潮流模型用于生成暂态仿真所需要的初始

潮流数据；

利用所述暂态仿真模型，仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性。

进一步地，采用注入母线电流作为稳态潮流模型，将 MMC 换流器等效为 PQ 节点或 PV 节点；

当 MMC 换流器等效为 PQ 节点，注入母线的电流相量为：

$$\begin{cases} I_R = \frac{V_R P_{ref} + V_I Q_{ref}}{V_R^2 + V_I^2} \\ I_I = \frac{V_I P_{ref} - V_R Q_{ref}}{V_R^2 + V_I^2} \end{cases}$$

其中， $V_R + jV_I$ 为注入母线电压相量； P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为注入母线的方向为正的有功功率和无功功率； I_R 、 I_I 分别表示注入母线的电流相量的实部和虚部； V_R 、 V_I 分别表示注入母线的电压相量的实部和虚部；

当 MMC 换流器等效为 PV 节点，注入母线的方向为正的无功功率给定值 Q_{ref} 的值通过对母线电压给定值与反馈值的差进行积分来确定，其余参数与 MMC 换流器等效为 PQ 节点应相同。

进一步地，所述交流侧暂态模型为：

$$\begin{cases} L_c \frac{di_d}{dt} + R_c i_d = v_{cd} - v_{pd} + \omega L_c i_q \\ L_c \frac{di_q}{dt} + R_c i_q = v_{cq} - v_{pq} - \omega L_c i_d \end{cases}$$

对于 MMC 换流器来说， R_c 和 L_c 的表达式为：

$$L_c = L_t + \frac{L_{arm}}{2}, \quad R_c = R_t + \frac{R_{arm}}{2}$$

其中， i_d 、 i_q 分别表示三相电流在 d 、 q 轴上的分量， v_c 表示换流阀出口的电压， v_p 表示公共联结点 PCC 母线电压， i 为交流母线上的电流， R_c 和 L_c 分别为交流侧的等效电阻和等效电抗； L_t ， R_t 分别为换流变压器的等效电抗和等效电阻，所述换流变压器的等效电阻和等效电抗接近于 0， L_{arm} 、 R_{arm} 分别为桥臂电抗和桥臂等效电阻； v_{pd} 、 v_{pq} 分别为公共联结点母线 PCC 在 d 轴的电压、在 q 轴的电压。

进一步地，所述直流侧暂态模型包括建立受控直流电流源 I_{dc} 和等效电容 C_{eq} ；

等效电容 C_{eq} 的表达式如下：

$$C_{eq} = \frac{6C_{sm}}{N}$$

受控直流电流源 I_{dc} 的表示式如下：

$$I_{dc} = \frac{P_{dc}}{U_{dc}} = \frac{P_{ac} - P_{loss}}{U_{dc}} = \frac{v_{cd}i_d + v_{cq}i_q}{U_{dc}}$$

其中： N 为 MMC 单个桥臂的子模块数； C_{sm} 为子模块中的电容； P_{dc} 为受控电流源的功率； U_{dc} 为受控电流源的电压； P_{ac} 、 P_{loss} 分别为交流侧输入的有功功率和 MMC 换流器功率损耗； v_{cd} 、 v_{cq} 分别为 MMC 换流器 d 轴和 q 轴的出口电压； i_d 、 i_q 分别为交流电流在 d、q 轴上的分量。

进一步地，还包括建立控制系统模型，采用双闭环控制结构的 dq 轴解耦控制方式，包括外环控制器和内环控制器；所述外环控制器基于有功功率和无功功率的初始潮流数据和附加参考值增量，用于产生内环控制器中交流电流 dq 轴分量的参考值 i_{dref} 和 i_{qref} ；

所述内环电流控制器将外环控制器的输出作为参考值，同时将经过 dq 变换之后的电流测量值作为反馈量，利用解耦负反馈 PI 控制结构实现对 PCC 电流瞬时值的跟踪控制。

进一步地，所述内环电流控制器以 MMC 换流器 d、q 轴的出口电压表示，分别为：

$$v_{cd} = \frac{U_{dc}}{U_{dc0}} \frac{1}{T_c s + 1} v_{cd}^*, \quad v_{cq} = \frac{U_{dc}}{U_{dc0}} \frac{1}{T_c s + 1} v_{cq}^*$$

其中， i_d 、 i_q 分别为交流电流在 d、q 轴上的分量， v_p 为公共联结点 PCC 母线电压的幅值； P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率的参考值； i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 轴分量的参考值和 q 轴分量的参考值； v_{cd}^* 、 v_{cq}^* 分别为 MMC 换流器 d 轴和 q 轴的出口电压 v_{cd} 、 v_{cq} 参考值； v_{pd} 、 v_{pq} 公共联结点母线 PCC 在 d 轴的电压、在 q 轴的电压； U_{dc} 为当前的直流电压， U_{dc0} 为各 MMC 换流器稳定后的初始直流电压， T_c 为调制过程产生的延时，经相位补偿之后忽略； K_{pd} 、 K_{pq} 分别为 d、q 轴的比例系数， K_{id} 、 K_{iq} 分别为 d、

q 轴的积分系数；s 表示复数； ω 表示基频角速度。

进一步地，将控制系统模型中的交流电流相量转换到以 PCC 母线电压为基准的同步旋转 dq 坐标系中，用于内环控制器对交流电流 i_d 、 i_q 进行控制，包括：

交流电流 dq 轴的表达式为：

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{I_{PR}^2 + I_{PI}^2} \cos(\arctan(\frac{I_{PI}}{I_{PR}}) - \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}})) \\ i_q &= \sqrt{I_{PR}^2 + I_{PI}^2} \sin(\arctan(\frac{I_{PI}}{I_{PR}}) - \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}})) \end{aligned}$$

得到的内环控制器和交流侧模型之后得到注入母线的交流电流在 d、q 轴上的分量 i_d 和 i_q ，将交流电流在 d、q 轴上的分量 i_d 、 i_q 的相量反变换到以系统松弛节点为基准的同步旋转坐标系下，变换的表达式为：

$$\begin{aligned} I_{PR} &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \cos(\arctan(\frac{i_q}{i_d}) + \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}})) \\ I_{PI} &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \sin(\arctan(\frac{i_q}{i_d}) + \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}})) \end{aligned}$$

其中： I_{PI} 、 I_{PR} 分别为交流电流在 d、q 轴上的分量 i_d 、 i_q 相量的实部和虚部； V_{PI} 、 V_{PR} 分别为 PCC 母线电压的相量的实部和虚部。

进一步地，还包括至少一个基于外环控制结构进行功能扩展的附加模块，所述附加模块在柔性直流及直流电网的交流侧和直流侧设置闭锁信号产生逻辑，通过所述柔性直流及直流电网的交流侧和直流侧的外环控制结构连接。

进一步地，所述利用暂态仿真模型，仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性，包括：

所述稳态潮流模型用于生成暂态仿真所需要的初始潮流数据；

所述交流侧暂态模型用于模拟柔性直流及直流电网交流侧的动态特性；

所述控制系统模型用于模拟柔性直流及直流电网交流侧的控制特性，包括：定交流/直流电压控制、有功/无功功率紧急提升/回降控制功能；

所述直流侧暂态模型用于模拟柔性直流及直流电网直流侧电压、电流的暂稳态过程；

所述附加模块用于模拟 MMC 换流器闭锁特性和附加控制功能。

本发明还提供一种柔性直流及直流电网机电暂态仿真系统，其改进之处在于，所述系统包括：

建模模块：建立暂态仿真模型，包括基于受控电流源的稳态潮流模型、交流侧暂态模型、直流侧暂态模型，所述基于受控电流源的稳态潮流模型用于生成暂态仿真所需要的初始潮流数据；

仿真模块：用于利用暂态仿真模型，仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性。

进一步地，所述建模模块，进一步包括：

潮流模型建模模块：用于建立生成暂态仿真所需要的初始潮流数据、基于受控电流源的稳态潮流模型；

交流模型建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网交流侧的动态特性的交流侧暂态模型；

控制系统建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网交流侧的控制特性，包括：定交流/直流电压控制、有功/无功功率紧急提升/回降控制功能的控制系统模型；

直流模型建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网直流侧电压、电流的暂稳态过程的直流侧暂态模型；

附加模块建模模块：用于建立模拟 MMC 换流器的闭锁特性和附加控制功能。

与最接近的现有技术相比，本发明提供的技术方案具有的优异效果是：

本发明提供一种基于 MMC 的柔性直流及直流电网机电暂态仿真建模方法，该方法能够准确地模拟柔性直流交流侧和直流侧的暂态特性和控制特性，并能实现故障下换流器闭锁和附加控制等功能。基于商业机电暂态仿真软件的用户自定义功能模块建立了柔性直流的机电暂态仿真模型，并与 PSCAD/EMTDC 中的详细电磁暂态仿真模型进行了对比分析，验证了机电模型的仿真精度。该建模方法的提出为大规模交直流系统的机电暂态仿真提供了指导性参考，对实际柔性直流及直流电网工程的前期规划和系统设计起到了技术支撑的作用。具体的：

1、该发明提出了基于受控电流源的稳态潮流模型，不考虑直流网络的初值计算，在不影响暂态仿真精度和稳定性的前提下简化了稳态潮流模型的计算过程，并提高了模型的可扩展性。

2、该发明提出了考虑 MMC 调制过程动态特性的模型优化方法，提高了机电模

型对于暂态过程的仿真精度。

3、基于该发明所提出的建模方法，在商业机电暂态仿真软件中建立了相应的双端柔性直流模型和四端直流电网模型，通过与 PSCAD/EMTDC 中的详细电磁暂态模型进行仿真对比，验证了模型的准确性和有效性。

附图说明

图 1 是本发明提供的基于 MMC 的柔性直流及直流电网机电暂态仿真建模方法的流程图；

图 2 是本发明提供的以两端系统为例的稳态潮流模型原理图；其中（a）为母线 1 的稳态潮流模型原理图；（b）为母线 2 的稳态潮流模型原理图；

图 3 是本发明提供的 MMC 换流器的交流侧等效电路原理图；

图 4 是本发明提供的用户自定义模型与主程序接口电路原理图；

图 5 是本发明提供的外环控制器结构图；

图 6 是本发明提供的内环控制器结构图；

图 7 是本发明提供的以两端系统为例的直流网络等效模型原理图；

图 8 是本发明提供的闭锁信号产生逻辑原理图。

具体实施方式

下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细说明。

以下描述和附图充分地示出本发明的具体实施方案，以使本领域的技术人员能够实践它们。其他实施方案可以包括结构的、逻辑的、电气的、过程的以及其他的改变。实施例仅代表可能的变化。除非明确要求，否则单独的组件和功能是可选的，并且操作的顺序可以变化。一些实施方案的部分和特征可以被包括在或替换其他实施方案的部分和特征。本发明的实施方案的范围包括权利要求书的整个范围，以及权利要求书的所有可获得的等同物。在本文中，本发明的这些实施方案可以被单独地或总地用术语“发明”来表示，这仅仅是为了方便，并且如果事实上公开了超过一个的发明，不是要自动地限制该应用的范围为任何单个发明或发明构思。

实施例一、

本发明所提出的柔性直流及直流电网机电暂态仿真建模方法的流程图如图 1 所示，包括：

S1：建立 1）基于受控电流源的稳态潮流模型；2）交流侧暂态模型；3）控制系统模型；4）直流侧暂态模型和 5）其他附加功能模块；

S2: 利用上述模型, 仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性。

在建立基于受控电流源的稳态潮流模型之前, 还包括: 确定稳态潮流参数, 即确定 MMC 换流器的注入母线电压、电流、有功功率和无功功率。

其中:

S101: 建立基于受控电流源的稳态潮流模型, 其原理图如图 2 (a)、(b) 所示, 包括:

对于交流系统来说, 每一个换流站可以等效为一个 PQ 节点或者 PV 节点。在进行自定义建模时, 换流站用受控电流源来进行等效, 通过控制注入母线的电流来实现与交流系统的功率交互。假设某侧换流站为 PQ 节点, 有功功率和无功功率的给定值分别为 P_{ref} 和 Q_{ref} (以注入母线的方向为正), 母线电压相量为 $V_R + jV_I$, 则注入母线的电流的相量为:

$$\begin{cases} I_R = \frac{V_R P_{ref} + V_I Q_{ref}}{V_R^2 + V_I^2} \\ I_I = \frac{V_I P_{ref} - V_R Q_{ref}}{V_R^2 + V_I^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中: I_R 、 I_I 分别表示注入母线的电流相量的实部和虚部; V_R 、 V_I 分别表示注入母线的电压相量的实部和虚部。

如果换流站为 PV 节点, 则无功功率给定值 Q_{ref} 可通过对母线电压给定值与反馈值的差进行积分来确定。如果忽略换流器和直流线路的损耗, 则各个换流站有功功率满足功率守恒定律。忽略功率损耗虽然在潮流计算环节可能会带来一些误差, 但并不影响后续的暂态稳定仿真(暂态稳定仿真可能需要一段时间的振荡来重新调整潮流计算结果), 同时简化了稳态模型。

S102: 建立交流侧暂态模型, 其原理图如图 3 所示, 包括:

依据换流站交流侧等效电路建立三相静止坐标系下的数学模型, 然后利用 Park-Clark 变换将三相静止坐标系下的数学模型转换到 dq 同步旋转坐标系下, 将三相时变变量转换为恒定的直流量, 便于控制器的设计。同步旋转坐标系下的 MMC 交流侧数学模型为:

$$\begin{cases} L_c \frac{di_d}{dt} + R_c i_d = v_{cd} - v_{pd} + \omega L_c i_q \\ L_c \frac{di_q}{dt} + R_c i_q = v_{cq} - v_{pq} - \omega L_c i_d \end{cases} \quad (2)$$

式中, i_d 、 i_q 分别表示三相电流在 d 、 q 轴上的分量, v_c 表示换流阀出口电压, v_p 表示公共联结点 PCC (Point of Common Connection, PCC) 母线电压, i 为交流母线上的电流, R_c 和 L_c 分别为交流侧的等效电阻和等效电抗; L_t , R_t 分别为换流变压器的等效电抗和等效电阻, 所述换流变压器的等效电阻和等效电抗接近于 0, L_{arm} 、 R_{arm} 分别为桥臂电抗和桥臂等效电阻; v_{pd} 、 v_{pq} 分别为公共联结点母线 PCC 在 d 轴的电压、在 q 轴的电压。附图 3 中 R_s 和 L_s 分别为交流侧电源的等效电阻和等效电抗

对于 MMC 换流器来说, R_c 和 L_c 的表达式为:

$$L_c = L_t + \frac{L_{arm}}{2}, \quad R_c = R_t + \frac{R_{arm}}{2} \quad (3)$$

其中, L_t , R_t 分别为换流变压器的等效电抗和电阻, L_{arm} , R_{arm} 分别为桥臂电抗和桥臂等效电阻; v_{pd} 、 v_{pq} 分别为公共联结点母线 PCC 在 d 轴的电压、在 q 轴的电压。

交流侧模型与 PSASP 主程序的接口通过设置一个变压器支路来实现。用户自定义模型与主程序接口电路原理图如图 4 所示, 变压器支路的作用如下: 1) 为自定义模型提供主程序的反馈数据; 2) 模拟实际工程换流变压器的接线方式, 保证故障下的仿真准确性。由于实际变压器的参数已包含在了式 (3) 中, 为了避免对控制系统的精度产生影响, 应设置变压器的等效电阻和等效电抗接近于 0。

S103: 建立控制系统模型, 包括:

模型的控制系统采用双闭环控制结构的 dq 轴解耦控制方法。外环控制器的作用是产生内环控制器中交流电流 dq 轴分量的参考值 i_{dref} 和 i_{qref} 。外环控制器的设计有不同的方法, 本方法基于有功功率和无功功率的参考值, 利用式 (4) 直接计算出交流电流 dq 轴分量的参考值, 其中 V_p 为 PCC 母线电压的幅值。该控制方法具有较为快速的动态响应。当换流站采用定直流电压控制或定交流电压控制时, 可利用 PI 反馈控制生成相应有功功率或无功功率的参考值。外环控制器的初始参考值 P_0 , Q_0 , U_{ac0} 来自稳态潮流的计算结果, 直流电压的初始给定值 U_{dc0} 通常设为 1pu。此外, 外环

控制器还加入了基于功率原图的电流限幅环节,防止过流对换流器产生损害,同时限制了与交流系统交互的有功功率和无功功率,使机电暂态仿真更接近实际工程的运行工况。外环控制器结构如图 5 所示。

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{P_{ref}}{V_p} \\ i_{qref} = \frac{-Q_{ref}}{V_p} \end{cases} \quad (4)$$

内环电流控制器将外环控制器的输出作为参考值,同时将经过 dq 变换之后的电流测量值作为反馈量,利用解耦负反馈 PI 控制结构实现对 PCC 电流瞬时值的跟踪控制。内环控制器结构如图 6 所示,仅考虑正序电流控制,则换流器出口电压 v_{cd} , v_{cq} 参考值的计算公式如下:

$$\begin{cases} v_{cd}^* = v_{pd} - \omega L_c i_q + (K_{pd} + \frac{K_{id}}{s})(i_{dref} - i_d) \\ v_{cq}^* = v_{pq} + \omega L_c i_d + (K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s})(i_{qref} - i_q) \end{cases} \quad (5)$$

通常在机电仿真时,假设换流器的出口电压能够很好地跟随给定值,因此将 MMC 和阀基控制系统等效为一个一阶惯性环节。然而,在实际工程中,当直流电压因为故障产生波动后,由于控制方法和调制策略等原因,换流器出口电压并不能很好地跟随给定值,因此系统的有功功率和无功功率会产生相应的波动。因此,考虑直流电压波动的影响,换流器出口电压可表示为:

$$v_{cd} = \frac{U_{dc}}{U_{dc0}} \frac{1}{T_c s + 1} v_{cd}^*, \quad v_{cq} = \frac{U_{dc}}{U_{dc0}} \frac{1}{T_c s + 1} v_{cq}^* \quad (6)$$

其中, i_d 、 i_q 分别为交流电流在 d 、 q 轴上的分量, v_p 为公共联结点 PCC 母线电压的幅值; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率的参考值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 轴分量的参考值和 q 轴分量的参考值; v_{cd}^* 、 v_{cq}^* 分别为 MMC 换流器 d 轴和 q 轴的出口电压 v_{cd} 、 v_{cq} 参考值; v_{pd} 、 v_{pq} 公共联结点母线 PCC 在 d 轴的电压、在 q 轴的电压; U_{dc} 为当前的直流电压, U_{dc0} 为各 MMC 换流器稳定后的初始直流电压, T_c 为调制过程产生的延时,经相位补偿之后忽略; K_{pd} 、 K_{pq} 分别为 d 、 q 轴的比例系数, K_{id} 、 K_{iq} 分别为 d 、 q 轴的积分系数; s 表示复数, ω 表示基频角速度。当直流电压因故障产生波动后,

换流器出口电压能够将这个波动传递到交流侧，用以模拟交流线路功率的波动。

在机电暂态仿真中，PLL 控制的动态过程可以忽略，PCC 点母线电压的相角可以从系统主程序中直接获得。由于内环控制器需要对交流电流进行控制，因此需要将交流电流的相量转换到以 PCC 母线电压为基准的坐标系中。假设 RI 为以系统松弛节点为基准的同步旋转坐标系， dq 为以 PCC 母线电压为基准的同步旋转坐标系，从主程序中获得的 PCC 母线电压的相量为 $V_{PR} + jV_{PI}$ ，交流电流的相量为 $I_{PR} + jI_{PI}$ ，则交流电流 dq 轴的表达式为：

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{I_{PR}^2 + I_{PI}^2} \cos(\arctan(\frac{I_{PI}}{I_{PR}}) - \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}})) \\ i_q &= \sqrt{I_{PR}^2 + I_{PI}^2} \sin(\arctan(\frac{I_{PI}}{I_{PR}}) - \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}})) \end{aligned} \quad (7)$$

经过内环控制器和交流侧模型之后会得到注入母线的电流分量 i_d 和 i_q ，需要将其反变换到以系统松弛节点为基准的同步旋转坐标系下，变换的表达式为：

$$\begin{aligned} I_{PR} &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \cos(\arctan(\frac{i_q}{i_d}) + \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}})) \\ I_{PI} &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \sin(\arctan(\frac{i_q}{i_d}) + \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}})) \end{aligned} \quad (8)$$

其中： I_{PI} 、 I_{PR} 分别为交流电流在 d 、 q 轴上的分量 i_d 、 i_q 相量的实部和虚部； V_{PI} 、 V_{PR} 分别为 PCC 母线电压的相量的实部和虚部。

S104：建立直流侧暂态模型，以两端系统为例直流网络等效模型的原理图如图 7 所示，包括：

MMC 直流侧暂态模型由一个受控直流电流源 I_{dc} 和一个等效电容 C_{eq} 组成。由于 MMC 直流侧的动态特性由分布于子模块中的电容 C_{sm} 来决定，因此需要依据 C_{sm} 来求取直流侧等效电容 C_{eq} 的值。根据能量守恒定律可得：

$$C_{eq} = \frac{6C_{sm}}{N} \quad (9)$$

式中， N 为 MMC 单个桥臂的子模块数。根据功率守恒定律，MMC 交流侧有功功率应该等于直流侧有功功率加上换流器的损耗，因此等效直流电流源可以表示为：

$$I_{dc} = \frac{P_{dc}}{U_{dc}} = \frac{P_{ac} - P_{loss}}{U_{dc}} = \frac{v_{cd}i_d + v_{cq}i_q}{U_{dc}} \quad (10)$$

对于直流线路的建模来说,因为在机电暂态仿真中通常不考虑系统的高频响应特性,因此为了简化直流网络的分析过程,可采用 π 型 RLC 电路来模拟直流线路。依据实际工程设计经验,通常情况下直流线缆的对地电容相对直流侧等效电容来说较小,对换流器外特性和控制特性的影响有限,因此在建模过程中可以忽略不计或直接并入等效电容中,这样直流网络便可以进一步化简为 RL 电路。针对两端直流输电系统或多端直流电网,依据不同的拓扑结构,可以列写相应的直流侧电路方程,并依据方程建立相应的模型。

S105 建立附加功能模块, 包括:

本发明所提的建模方法实现了 MMC 闭锁的功能。在机电暂态仿真中, MMC 子模块的开通和关断无法体现,同时交流侧和直流侧之间没有电气上的直接联系,因此仅能通过修改相应的数学模型来对 MMC 的闭锁过程进行模拟。当系统在交流侧或直流侧发生故障后,交流电流迅速上升导致桥臂电流超过阈值时,换流器应迅速闭锁。同理,当直流电压迅速上升或下降并超过阈值时,换流器也应迅速闭锁。因此,可以依照实际控制保护系统,在模型中增加闭锁信号产生的逻辑。闭锁信号产生逻辑如图 8 所示,在接收到闭锁信号后,设置注入交流母线的电流为零,即 $i_d=0, i_q=0$ 。当闭锁发生 60ms 后,再设置变压器支路的阻抗为无穷大,模拟交流侧断路器跳闸的动作。以上的实现方法基于机电暂态仿真的特点,对换流器闭锁的过程进行了等效简化,有利于分析换流器闭锁对交流系统的影响。

步骤 S2 中,在机电暂态仿真中,稳态潮流模型是暂态仿真的基础,用以生成暂态仿真所需要的初始潮流数据。交流侧暂态模型以及控制系统模型的主要功能是用来模拟柔性直流交流侧的动态特性和控制性能。控制系统采用工程上常见的基于 dq 旋转坐标系的双闭环矢量控制方法,能够实现定交流/直流电压控制、有功/无功功率紧急提升/回降等控制功能。直流侧模型用以模拟柔性直流及直流电网直流侧电压、电流的暂稳态过程,其动态特性由直流侧等效电容来决定。交直流侧模型之间通过功率平衡联系起来,即交流侧有功功率等于直流侧有功功率与换流器损耗之和。附加功能主要包括直流侧故障模拟、换流器闭锁模拟和其他附加的控制策略,保证了模型能够更精细地仿真实际系统不同工况下的运行特性。此外,本发明所提的建模方法具有模

块化的特性，可方便地扩展成任意端数的多端直流系统和直流电网。

此外，该建模方法具有良好的可扩展性，通过修改外环控制结构，可以添加不同的附加控制策略。例如，可以针对交流系统的频率稳定 and 低频振荡抑制添加相应的附加频率控制措施，或者针对直流电网的安全稳定运行添加相应的多换流站协调控制策略。

实施例二、

基于同样的发明构思，本发明还提供一种基于 MMC 换流器的柔性直流及直流电网机电暂态仿真系统，包括：

建模模块：用于建立基于受控电流源的稳态潮流模型、交流侧暂态模型、控制系统模型、直流侧暂态模型和附加功能模型；

仿真模块：用于利用上述模型，仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性。

建模模块，进一步包括：

潮流模型建模模块：用于建立生成暂态仿真所需要的初始潮流数据、基于受控电流源的稳态潮流模型；

交流模型建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网交流侧的动态特性的交流侧暂态模型；

控制系统建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网交流侧的控制特性，包括：定交流/直流电压控制、有功/无功功率紧急提升/回降控制功能的控制系统模型；

直流模型建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网直流侧电压、电流的暂稳态过程的直流侧暂态模型；

附加模型建模模块：用于建立模拟直流侧故障和 MMC 换流器闭锁特性的附加功能模型。

本发明基于商业化的机电暂态仿真软件 PSASP 的用户自定义模型功能开发了双端柔性直流模型和四端直流电网模型，并已用于多个实际工程的系统仿真分析，对工程的规划和建设具有指导意义。该建模方法还可以应用于其他的商业软件如 PSS/E 中。

以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制，尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明，所属领域的普通技术人员依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换，这些未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换，均在申请待批的本发明的权利要求保护范围之内。

权 利 要 求

1、一种基于 MMC 换流器的柔性直流及直流电网机电暂态仿真方法，其特征在于，包括：

建立暂态仿真模型，包括基于受控电流源的稳态潮流模型、交流侧暂态模型、直流侧暂态模型，所述基于受控电流源的稳态潮流模型用于生成暂态仿真所需要的初始潮流数据；

利用所述暂态仿真模型，仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性。

2、如权利要求 1 所述的柔性直流及直流电网机电暂态建模方法，其特征在于，采用注入母线电流作为稳态潮流模型，将 MMC 换流器等效为 PQ 节点或 PV 节点；

当 MMC 换流器等效为 PQ 节点，注入母线的电流相量为：

$$\begin{cases} I_R = \frac{V_R P_{ref} + V_I Q_{ref}}{V_R^2 + V_I^2} \\ I_I = \frac{V_I P_{ref} - V_R Q_{ref}}{V_R^2 + V_I^2} \end{cases}$$

其中， $V_R + jV_I$ 为注入母线电压相量； P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为注入母线的方向为正的有功功率和无功功率； I_R 、 I_I 分别表示注入母线的电流相量的实部和虚部； V_R 、 V_I 分别表示注入母线的电压相量的实部和虚部；

当 MMC 换流器等效为 PV 节点，注入母线的方向为正的无功功率给定值 Q_{ref} 的值通过对母线电压给定值与反馈值的差进行积分来确定，其余参数与 MMC 换流器等效为 PQ 节点应相同。

3、如权利要求 1 所述的柔性直流及直流电网机电暂态建模方法，其特征在于，所述交流侧暂态模型为：

$$\begin{cases} L_c \frac{di_d}{dt} + R_c i_d = v_{cd} - v_{pd} + \omega L_c i_q \\ L_c \frac{di_q}{dt} + R_c i_q = v_{cq} - v_{pq} - \omega L_c i_d \end{cases}$$

对于 MMC 换流器来说， R_c 和 L_c 的表达式为：

$$L_c = L_t + \frac{L_{arm}}{2}, \quad R_c = R_t + \frac{R_{arm}}{2}$$

其中， i_d 、 i_q 分别表示三相电流在 d 、 q 轴上的分量， v_c 表示换流阀出口的电压， v_p 表示公共联结点 PCC 母线电压， i 为交流母线上的电流， R_c 和 L_c 分别为交流侧的等效电阻和等效电抗； L_t ， R_t 分别为换流变压器的等效电抗和等效电阻，所述换流变压器的等效电阻和等效电抗接近于 0， L_{arm} 、 R_{arm} 分别为桥臂电抗和桥臂等效电阻； v_{pd} 、

v_{pq} 分别为公共联结点母线 PCC 在 d 轴的电压、在 q 轴的电压。

4、如权利要求 1 所述的柔性直流及直流电网机电暂态建模方法，其特征在于，所述直流侧暂态模型包括建立受控直流电流源 I_{dc} 和等效电容 C_{eq} ；

等效电容 C_{eq} 的表达式如下：

$$C_{eq} = \frac{6C_{sm}}{N}$$

受控直流电流源 I_{dc} 的表示式如下：

$$I_{dc} = \frac{P_{dc}}{U_{dc}} = \frac{P_{ac} - P_{loss}}{U_{dc}} = \frac{v_{cd}i_d + v_{cq}i_q}{U_{dc}}$$

其中： N 为 MMC 单个桥臂的子模块数； C_{sm} 为子模块中的电容； P_{dc} 为受控电流源的功率； U_{dc} 为受控电流源的电压； P_{ac} 、 P_{loss} 分别为交流侧输入的有功功率和 MMC 换流器功率损耗； v_{cd} 、 v_{cq} 分别为 MMC 换流器 d 轴和 q 轴的出口电压； i_d 、 i_q 分别为交流电流在 d、q 轴上的分量。

5、如权利要求 1 所述的柔性直流及直流电网机电暂态建模方法，其特征在于，还包括建立控制系统模型，采用双闭环控制结构的 dq 轴解耦控制方式，包括外环控制器和内环控制器；所述外环控制器基于有功功率和无功功率的初始潮流数据和附加参考值增量，用于产生内环控制器中交流电流 dq 轴分量的参考值 i_{dref} 和 i_{qref} ；

所述内环电流控制器将外环控制器的输出作为参考值，同时将经过 dq 变换之后的电流测量值作为反馈量，利用解耦负反馈 PI 控制结构实现对 PCC 电流瞬时值的跟踪控制。

6、如权利要求 5 所述的柔性直流及直流电网机电暂态建模方法，其特征在于，所述内环电流控制器以 MMC 换流器 d、q 轴的出口电压表示，分别为：

$$v_{cd} = \frac{U_{dc}}{U_{dc0}} \frac{1}{T_c s + 1} v_{cd}^*, \quad v_{cq} = \frac{U_{dc}}{U_{dc0}} \frac{1}{T_c s + 1} v_{cq}^*$$

其中， i_d 、 i_q 分别为交流电流在 d、q 轴上的分量， v_p 为公共联结点 PCC 母线电压的幅值； P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率的参考值； i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 轴分量的参考值和 q 轴分量的参考值； v_{cd}^* 、 v_{cq}^* 分别为 MMC 换流器 d 轴和 q 轴的出口电压 v_{cd} 、 v_{cq} 参考值； v_{pd} 、 v_{pq} 公共联结点母线 PCC 在 d 轴的电压、在 q 轴的电压； U_{dc} 为当前的直流电压， U_{dc0} 为各 MMC 换流器稳定后的初始直流电压， T_c 为调制过程产生的延时，经相位补偿之后忽略； K_{pd} 、 K_{pq} 分别为 d、q 轴的比例系数， K_{id} 、 K_{iq} 分别为 d、

q 轴的积分系数；s 表示复数； ω 表示基频角速度。

7、如权利要求 6 所述的柔性直流及直流电网机电暂态建模方法，其特征在于，将控制系统模型中的交流电流相量转换到以 PCC 母线电压为基准的同步旋转 dq 坐标系中，用于内环控制器对交流电流 i_d 、 i_q 进行控制，包括：

交流电流 dq 轴的表达式为：

$$i_d = \sqrt{I_{PR}^2 + I_{PI}^2} \cos(\arctan(\frac{I_{PI}}{I_{PR}}) - \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}}))$$

$$i_q = \sqrt{I_{PR}^2 + I_{PI}^2} \sin(\arctan(\frac{I_{PI}}{I_{PR}}) - \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}}))$$

得到的内环控制器和交流侧模型之后得到注入母线的交流电流在 d、q 轴上的分量 i_d 和 i_q ，将交流电流在 d、q 轴上的分量 i_d 、 i_q 的相量反变换到以系统松弛节点为基准的同步旋转坐标系下，变换的表达式为：

$$I_{PR} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \cos(\arctan(\frac{i_q}{i_d}) + \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}}))$$

$$I_{PI} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \sin(\arctan(\frac{i_q}{i_d}) + \arctan(\frac{V_{PI}}{V_{PR}}))$$

其中： I_{PI} 、 I_{PR} 分别为交流电流在 d、q 轴上的分量 i_d 、 i_q 相量的实部和虚部； V_{PI} 、 V_{PR} 分别为 PCC 母线电压的相量的实部和虚部。

8、如权利要求 1 所述的柔性直流及直流电网机电暂态建模方法，其特征在于，还包括至少一个基于外环控制结构进行功能扩展的附加模块，所述附加模块在柔性直流及直流电网的交流侧和直流侧设置闭锁信号产生逻辑，通过所述柔性直流及直流电网的交流侧和直流侧的外环控制结构连接。

9、如权利要求 1-8 中任一项所述的柔性直流及直流电网机电暂态建模方法，其特征在于，所述利用暂态仿真模型，仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性，包括：

所述稳态潮流模型用于生成暂态仿真所需要的初始潮流数据；

所述交流侧暂态模型用于模拟柔性直流及直流电网交流侧的动态特性；

所述控制系统模型用于模拟柔性直流及直流电网交流侧的控制特性，包括：定交流/直流电压控制、有功/无功功率紧急提升/回降控制功能；

所述直流侧暂态模型用于模拟柔性直流及直流电网直流侧电压、电流的暂稳态过程；

所述附加模块用于模拟 MMC 换流器闭锁特性和附加控制功能。

10、一种柔性直流及直流电网机电暂态仿真系统，其特征在于，所述系统包括：建模模块：建立暂态仿真模型，包括基于受控电流源的稳态潮流模型、交流侧暂

态模型、直流侧暂态模型，所述基于受控电流源的稳态潮流模型用于生成暂态仿真所需要的初始潮流数据；

仿真模块：用于利用暂态仿真模型，仿真柔性直流及直流电网不同工况下的机电暂态运行特性。

11、如权利要求 10 所述的柔性直流及直流电网机电暂态仿真系统，其特征在于，所述建模模块，进一步包括：

潮流模型建模模块：用于建立生成暂态仿真所需要的初始潮流数据、基于受控电流源的稳态潮流模型；

交流模型建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网交流侧的动态特性的交流侧暂态模型；

控制系统建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网交流侧的控制特性，包括：定交流/直流电压控制、有功/无功功率紧急提升/回降控制功能的控制系统模型；

直流模型建模模块：用于建立模拟柔性直流及直流电网直流侧电压、电流的暂稳态过程的直流侧暂态模型；附加模块建模模块：用于建立模拟 MMC 换流器的闭锁特性和附加控制功能。

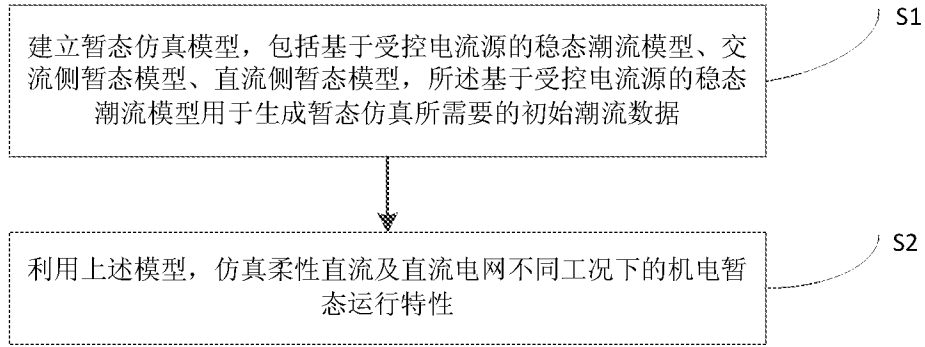
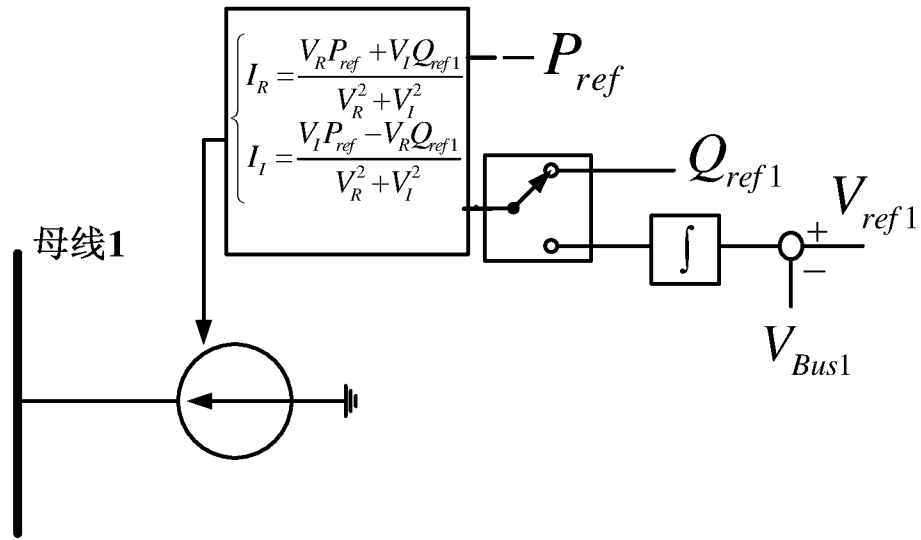
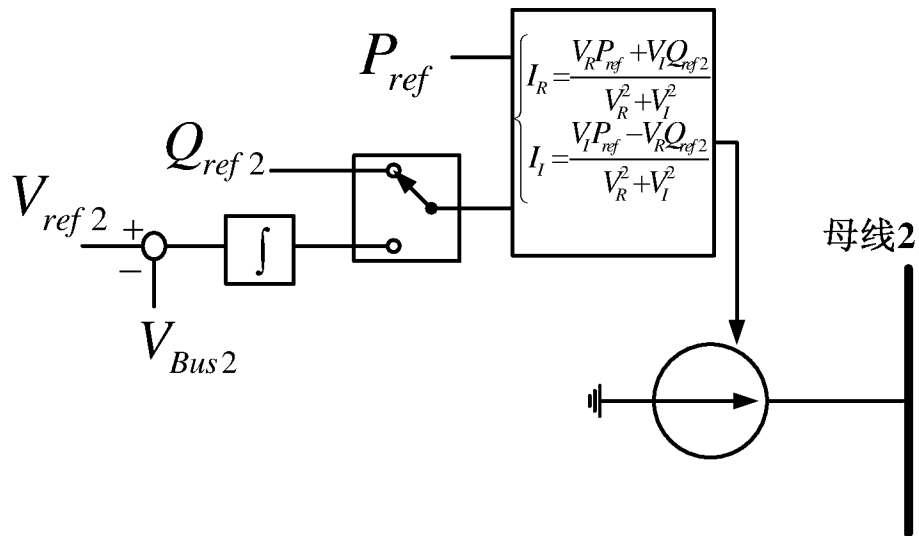


图 1



(a)



(b)

图 2

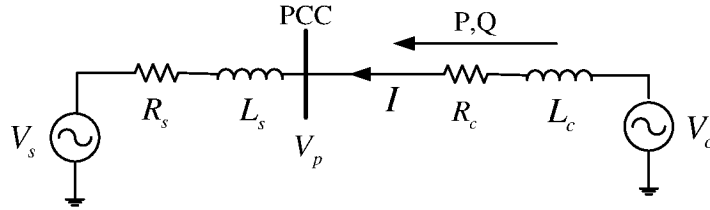


图 3

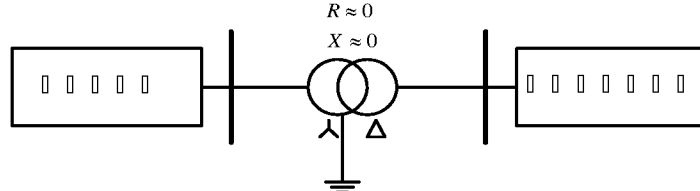


图 4

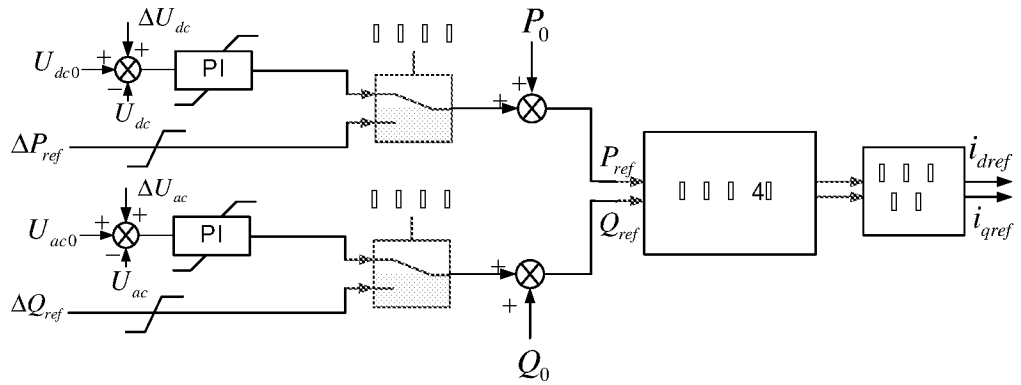


图 5

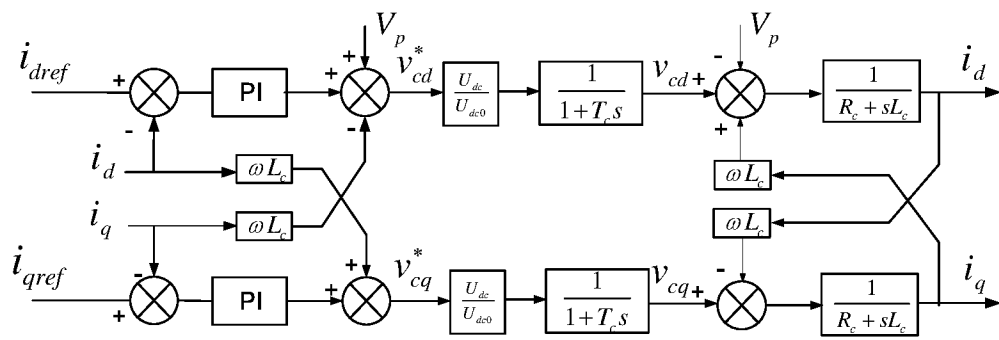


图 6

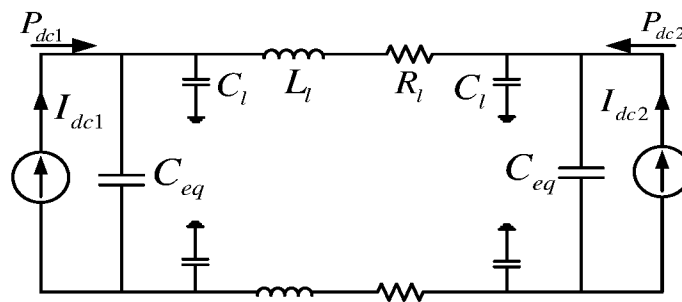


图 7

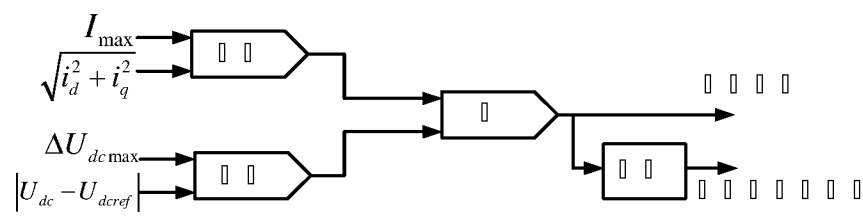


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/084529

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/00 (2006.01) i; H02J 3/06 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

DWPI, CNABS, SIPOABS, CNTXT, CNKI: 柔性, 直流, 电网, 机电, 暂态, 仿真, 模型, 稳态, 潮流, 交流侧, 直流侧, 数据, 外环, 内环, flexible, direct current, power grid, electromechanical, transient, simulation, model, steady state, power flow, AC side, DC side, data, outer loop, inner loop

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 103558766 A (STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.) 05 February 2014 (05.02.2014), description, paragraphs [0056]-[0104], and figures 1-10	1, 5, 10
A	CN 103558766 A (STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.) 05 February 2014 (05.02.2014), entire document	2-4, 6-9, 11
Y	CN 104076693 A (CHINA SOUTH POWER GRID ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) 01 October 2014 (01.10.2014), description, paragraphs [0006]-[0086], and figures 1-4	1, 5, 10
Y	CN 102842917 A (CHINA ENERGY ENGINEERING GROUP GUANGDONG ELECTRIC POWER DESIGN INSTITUTE CO., LTD. et al.) 26 December 2012 (26.12.2012), description, paragraphs [0005]-[0124], and figure 1	5

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 22 November 2017	Date of mailing of the international search report 05 December 2017
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer HAN, Beibei Telephone No. (86-10) 62089273

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/084529

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 103997060 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 20 August 2014 (20.08.2014), entire document	1-11
A	US 2016329714 A1 (THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ALABAMA) 10 November 2016 (10.11.2016), entire document	1-11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/084529

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 103558766 A	05 February 2014	None	
CN 104076693 A	01 October 2014	CN 104076693 B	25 January 2017
CN 102842917 A	26 December 2012	CN 102842917 B	16 December 2015
CN 103997060 A	20 August 2014	CN 103997060 B	07 December 2016
US 2016329714 A1	10 November 2016	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/084529

A. 主题的分类 H02J 3/00(2006.01)i; H02J 3/06(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																							
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) H02J 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) DWPI, CNABS, SIPOABS, CNTXT, CNKI: 柔性, 直流, 电网, 机电, 暂态, 仿真, 模型, 稳态, 潮流, 交流侧, 直流侧, 数据, 外环, 内环, flexible, direct current, power grid, electromechanical, transient, simulation, model, steady state, power flow, AC side, DC side, data, outer loop, inner loop																							
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Y</td> <td>CN 103558766 A (国家电网公司 等) 2014年 2月 5日 (2014 - 02 - 05) 说明书第[0056]-[0104]段, 图1-10</td> <td>1, 5, 10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103558766 A (国家电网公司 等) 2014年 2月 5日 (2014 - 02 - 05) 全文</td> <td>2-4, 6-9, 11</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 104076693 A (南方电网科学研究院有限责任公司) 2014年 10月 1日 (2014 - 10 - 01) 说明书第[0006]-[0086]段, 图1-4</td> <td>1, 5, 10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 102842917 A (中国能源建设集团广东省电力设计研究院 等) 2012年 12月 26日 (2012 - 12 - 26) 说明书第[0005]-[0124]段, 图1</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103997060 A (西安交通大学) 2014年 8月 20日 (2014 - 08 - 20) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2016329714 A1 (THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ALABAMA) 2016年 11月 10日 (2016 - 11 - 10) 全文</td> <td>1-11</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	Y	CN 103558766 A (国家电网公司 等) 2014年 2月 5日 (2014 - 02 - 05) 说明书第[0056]-[0104]段, 图1-10	1, 5, 10	A	CN 103558766 A (国家电网公司 等) 2014年 2月 5日 (2014 - 02 - 05) 全文	2-4, 6-9, 11	Y	CN 104076693 A (南方电网科学研究院有限责任公司) 2014年 10月 1日 (2014 - 10 - 01) 说明书第[0006]-[0086]段, 图1-4	1, 5, 10	Y	CN 102842917 A (中国能源建设集团广东省电力设计研究院 等) 2012年 12月 26日 (2012 - 12 - 26) 说明书第[0005]-[0124]段, 图1	5	A	CN 103997060 A (西安交通大学) 2014年 8月 20日 (2014 - 08 - 20) 全文	1-11	A	US 2016329714 A1 (THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ALABAMA) 2016年 11月 10日 (2016 - 11 - 10) 全文	1-11
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
Y	CN 103558766 A (国家电网公司 等) 2014年 2月 5日 (2014 - 02 - 05) 说明书第[0056]-[0104]段, 图1-10	1, 5, 10																					
A	CN 103558766 A (国家电网公司 等) 2014年 2月 5日 (2014 - 02 - 05) 全文	2-4, 6-9, 11																					
Y	CN 104076693 A (南方电网科学研究院有限责任公司) 2014年 10月 1日 (2014 - 10 - 01) 说明书第[0006]-[0086]段, 图1-4	1, 5, 10																					
Y	CN 102842917 A (中国能源建设集团广东省电力设计研究院 等) 2012年 12月 26日 (2012 - 12 - 26) 说明书第[0005]-[0124]段, 图1	5																					
A	CN 103997060 A (西安交通大学) 2014年 8月 20日 (2014 - 08 - 20) 全文	1-11																					
A	US 2016329714 A1 (THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ALABAMA) 2016年 11月 10日 (2016 - 11 - 10) 全文	1-11																					
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																							
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																							
国际检索实际完成的日期 2017年 11月 22日		国际检索报告邮寄日期 2017年 12月 5日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 韩蓓蓓 电话号码 (86-10)62089273																					

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/084529

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	103558766	A	2014年 2月 5日	无	
CN	104076693	A	2014年 10月 1日	CN 104076693	B 2017年 1月 25日
CN	102842917	A	2012年 12月 26日	CN 102842917	B 2015年 12月 16日
CN	103997060	A	2014年 8月 20日	CN 103997060	B 2016年 12月 7日
US	2016329714	A1	2016年 11月 10日	无	