(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
2020 年 6 月 11 日 (11.06.2020)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2020/113874 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01) *G06Q 50/06* (2012.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/081194

(22) 国际申请日: 2019 年 4 月 3 日 (03.04.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201811491738.7 2018年12月7日 (07.12.2018) CN
201811491963.0 2018年12月7日 (07.12.2018) CN

(71) 申请人: 上海交通大学 (**SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY**) [CN/CN]; 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。

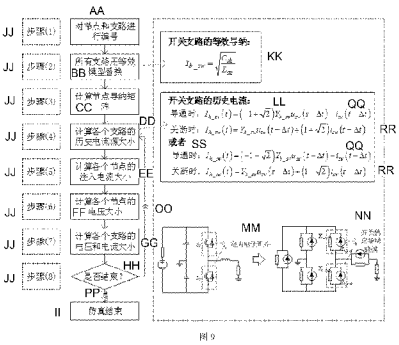
(72) 发明人: 汪可友 (**WANG, Keyou**); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。 徐晋 (**XU, Jin**); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。 李国杰 (**LI, Guojie**); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。 冯琳 (**FENG, Lin**); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。 韩蓓 (**HAN, Bei**); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。 江秀臣 (**JIANG, Xiuchen**); 中国上海市闵行区东川路800号, Shanghai 200240 (CN)。

(74) 代理人: 上海恒慧知识产权代理事务所（特殊普通合伙） (**SHANGHAI HENGHUI INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY**); 中国上海市徐汇区宜山路801号金陵商务广场A座504室张宁展, Shanghai 200233 (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, JO, 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,

(54) **Title:** CONSTANT ADMITTANCE MODELING AND REAL-TIME SIMULATION METHOD FOR POWER ELECTRONIC CONVERTER

(54) 发明名称: 电力电子换流器的定导纳建模与实时仿真方法



AA Number a node and a branch
BB Replace all branches with equivalent models
CC Calculate a node admittance matrix
DD Calculate the magnitude of a historical current source of each branch
EE Calculate the magnitude of an injection current of each node
FF Calculate the magnitude of the voltage of each node
GG Calculate the magnitudes of the voltage and current of each branch
HH End?
II Simulation ends
JJ Step
KK Equivalent admittance of a switch branch
LL Historical current of a switch branch
MM Power electronic switch
NN Constant admittance modeling of a switch
OO No
PP Yes
QQ When the switch branch is turned on
RR When the switch branch is turned off
SS Or

(57) **Abstract:** A constant admittance modeling and real-time simulation method for a power electronic converter, the method comprising the following steps: replacing a resistor branch, an inductor branch, a capacitor branch and a switch branch in a power electronic converter with an equivalent model where an equivalent admittance and a historical current source are connected in parallel; replacing an independent voltage source branch with an equivalent model where an equivalent admittance and an equivalent current source are connected in parallel; according to the equivalent admittance of each branch, calculating a node admittance matrix of a simulated circuit; and according to the magnitudes of the historical current source and the equivalent current source at the current simulation time and in conjunction with the node admittance matrix and the equivalent admittance of each branch, calculating each branch voltage and each branch current so as to complete the final simulation. The present invention can quickly attenuate a transient error after a switch action while avoiding re-forming an admittance matrix after the switch action, solves the problem of virtual power loss when a traditional modeling and simulation method is used for real-time simulation of a power electronic converter, and greatly improves the simulation accuracy.

WO 2020/113874 A1

[见续页]

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))。

(57) 摘要：一种电力电子换流器的定导纳建模与实时仿真方法，包括如下步骤：电力电子换流器中的电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路用一个等效导纳和一个历史电流源并联的等效模型替换，独立电压源支路用一个等效导纳和一个等效电流源并联的等效模型替换，根据各个支路的等效导纳，计算被仿真电路的节点导纳矩阵，根据当前仿真时刻的历史电流源和等效电流源的大小，结合节点导纳矩阵以及各个支路的等效导纳，计算出各个支路电压和支路电流，完成最后的仿真。本发明在避免开关动作后重新形成导纳矩阵的同时，可以使开关动作后的暂态误差快速衰减，解决了传统建模仿真方法在用于电力电子换流器实时仿真时的虚拟功率损耗问题，极大地提高了仿真精度。

电力电子换流器的定导纳建模与实时仿真方法

技术领域

本发明涉及电力系统技术领域，具体地，涉及一种电力电子换流器的定导纳建模与实时仿真方法。

背景技术

电磁暂态仿真是电力系统仿真的重要组成部分。其基本理论与方法由加拿大的 H.W Dommel 于 20 世纪 60 年代末提出。针对不同类型的应用,电磁暂态仿真可分为离线仿真和实时仿真。通常来说,离线仿真工具的计算时间要远多于所研究暂态现象的持续时间。而在面向对时间有严格要求的应用场景时，实时仿真器通过软硬件平台相互配合，保证了仿真器内部时钟与现实世界时钟的精确同步，可以为各种电力系统保护与控制装置提供高度模拟现场实际的测试环境。

随着越来越多的电力电子设备引入电力系统，电力电子开关的高频离散特性给电力电子设备的建模与实时仿真的实现带来了巨大挑战。目前，在电磁暂态仿真中，电力电子开关主要采用的建模方法可以分为以下两种：

1） 二值电阻建模，即开关导通时用小电阻等效，关断时用大电阻等效；

2） 基于电感/电容等效的定导纳建模，即开关导通时用小电感等效，关断时用小电容等效；

二值电阻建模在开关状态变化时将引起开关支路的导纳突变，因此每次开关动作都需要重新形成导纳矩阵，效率低下，难以满足实时性要求，更多地应用于离线的电磁暂态仿真工具中，如 PSCAD-EMTDC，Matlab 的 Simpower Simulation Toolbox，EMTP 系列仿真软件等；

基于电感/电容等效的定导纳建模可以通过合理的参数设置，使小电感和小电容的等效导纳相等，避免了因开关动作导致的导纳矩阵改变，极大地提高了仿真效率，被应用于实时数字仿真仪 RTDS 的小步长模型库中。然而，受电感和电容物理特性的制约，这种定导纳模型在开关动作后存在明显暂态误差，仿真得到的换流器功率损耗远大于实际情况，严重影响了仿真精度，这一现象被称为虚拟功率损耗问题。

目前没有发现同本发明类似技术的说明或报道，也尚未收集到国内外类似的资料。

发明内容

针对已有电力电子换流器建模方法的不足，本发明的目的在于提供一种专门用于电力电

子换流器的定导纳建模与实时仿真方法，该方法在避免因开关动作导致的导纳矩阵改变的同时，解决了传统建模仿真方法在电力电子换流器实时仿真时的虚拟功率损耗问题，极大地提高了仿真精度。

本发明是通过以下技术方案实现的。

一种电力电子换流器的定导纳建模与实时仿真方法，包括如下步骤：

S1，将电力电子换流器及其所在电路中的各个支路和节点分别进行编号，其中接地节点的编号为0；

S2，将电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路，分别用一个等效导纳和一个历史电流源并联的等效模型替换；独立电压源支路用一个等效导纳和一个等效电流源并联的等效模型替换，计算各个支路等效模型的等效导纳，其中，开关支路等效模型在导通状态下和关断状态下采用相同的等效导纳；

S3，根据各个支路的等效导纳，计算被仿真电路的节点导纳矩阵；

S4，如果当前仿真时刻t是仿真初始时刻，则电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的历史电流源大小取零，独立电压源支路的等效电流另外计算；如果当前仿真时刻t不是仿真初始时刻，则根据上一仿真时刻电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的支路电压和支路电流，计算出当前仿真时刻电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的历史电流源大小，独立电压源支路的等效电流另外计算；

S5，根据当前仿真时刻的历史电流源和等效电流源的大小，计算流入各个节点的注入电流大小；

S6，根据流入各个节点的注入电流，结合节点导纳矩阵，计算出各个节点的电压大小；

S7，根据各个节点的电压，结合各个支路的等效导纳，计算出各个支路电压和支路电流；

S8，如果没有到达最后的仿真时刻，则返回S4，进入下一仿真时刻$t+\Delta t$；否则结束。

优选地，各个支路的等效导纳计算公式如下：

电阻支路的等效导纳为：$Y_{b_R}=\frac{1}{R}$；其中，R是电阻支路的电阻值；

电感支路的等效导纳为：$Y_{b_L}=\frac{\Delta t}{L}$；其中，$L$是电感支路的电感值，$\Delta t$是实时仿真的时间步长；

电容支路的等效导纳为：$Y_{b_C}=\frac{C}{\Delta t}$；其中，$C$是电容支路的电容值；

开关支路的等效导纳为：$Y_{b_sw}=\sqrt{\frac{C_{dc}}{L_{ac}}}$；其中，$C_{dc}$是电力电子换流器直流侧的电容，$L_{ac}$

是电力电子换流器交流侧的电感；

独立电压源支路的等效导纳为：$Y_{b_Vs}=\frac{1}{R_s}$；其中，R_s是独立电压源支路的内电阻。

当所述的电力电子换流器是三电平换流器时，历史电流和等效电流的计算公式如下：

电阻支路的历史电流为：$I_{h_R}=0$；

电感支路的历史电流为：$I_{h_L}(t)=i_L(t-\Delta t)$；其中，$i_L(t-\Delta t)$是上一仿真时刻电感支路的支路电流；

电容支路的历史电流为：$I_{h_C}(t)=-Y_{b_C}u_C(t-\Delta t)$；其中，$u_C(t-\Delta t)$是电容支路上一仿真时刻的支路电压，$Y_{b_C}$是电容支路的等效导纳；

导通时，开关支路的历史电流为：$I_{h_sw}(t)=-5.04Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$；关断时，开关支路的历史电流为：$I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-0.39i_{sw}(t-\Delta t)$；其中，$u_{sw}(t-\Delta t)$是上一仿真时刻开关支路的支路电压，$i_{sw}(t-\Delta t)$是上一仿真时刻开关支路的支路电流，$Y_{b_sw}$是开关支路的等效导纳；

独立电压源支路的等效电流源为$I_{s_Vs}(t)=\frac{V_s(t)}{R_s}$；其中，$V_s(t)$是独立电压源支路的内电势大小，$R_s$是独立电压源支路的内电阻大小；

当所述的电力电子换流器是二电平换流器时，历史电流和等效电流的计算公式如下：

电阻支路的历史电流 $I_{h_R}=0$；

电感支路的历史电流 $I_{h_L}(t)=i_L(t-\Delta t)$；其中，$i_L(t-\Delta t)$是上一仿真时刻电感支路的支路电流；

电容支路的历史电流：$I_{h_C}(t)=-Y_{b_C}u_C(t-\Delta t)$；其中，$u_C(t-\Delta t)$是电容支路上一仿真时刻的支路电压，$Y_{b_C}$是电容支路的等效导纳；

导通时，开关支路的历史电流：$I_{h_sw}(t)=\left(-1+\sqrt{2}\right)Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$；

关断时，开关支路的历史电流：$I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)+\left(1+\sqrt{2}\right)i_{sw}(t-\Delta t)$；

或者采用

导通时，开关支路的历史电流 $I_{h_sw}(t)=\left(-1-\sqrt{2}\right)Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$

关断时，开关支路的历史电流 $I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)+\left(1-\sqrt{2}\right)i_{sw}(t-\Delta t)$

其中，$u_{sw}(t-\Delta t)$ 是上一仿真时刻开关支路的支路电压，$i_{sw}(t-\Delta t)$ 是上一仿真时刻开关支路的支路电流，Y_{b_sw} 是开关支路的等效导纳；

独立电压源支路的等效电流源：$I_{s_Vs}(t)=\dfrac{V_s(t)}{R_s}$

其中，$V_s(t)$ 是独立电压源支路的内电势大小，R_s 是独立电压源支路的内电阻大小。

与现有技术相比，本发明具有如下技术效果：

（1）本发明在电力电子换流器中的开关支路等效模型在导通状态下和关断状态下采用相同的等效导纳，避免了仿真过程中因开关状态改变而重新形成导纳矩阵的操作，使得开关动作后的暂态误差快速衰减。

（2）采用本发明方法的实时仿真波形比传统的基于电感电容等效法更贴近理想开关波形，极大地提高了电力电子换流器的实时仿真精度。对于理想开关组成的换流器而言，没有虚拟功率损耗，而在传统的基于电感/电容等效的仿真方法下，电力电子换流器的虚拟功率损耗随着开关频率的增大而增大，如图 3 所示，在 100kHz 时高达 60%以上，和实际严重不符。在本发明方法下，电力电子换流器的虚拟功率损耗基本不随开关频率变化，始终维持在接近零的水平，更加贴近理想开关组成的换流器。

附图说明

通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述，本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显：

图 1 是本发明电阻支路、电感支路、电容支路以及开关支路的等效模型示意图；

图 2 是本发明实施例 1 三电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法电流波形对比；

图 3 是本发明实施例 1 三电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法电压波形对比；

图 4 是本发明实施例 1 三电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法在不同换流器开关频率下的虚拟功率损耗率；

图 5 是本发明实施例 1 三电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法的电路图；其中，（a）为单相三电平换流器电路图，（b）为通用三电平换流器等效电路图，（c）为三电平换流器定导纳等效模型电路图；

图 6 是本发明实施例 1 三电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法流程图。

图 7 是本发明实施例 2 两电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法电流波形对比；

图 8 是含单相两电平桥式换流器的简单电路；

图 9 是本发明实施例 2 两电平桥式换流器的定导纳建模与实时仿真方法流程图。

具体实施方式

下面对本发明的实施例作详细说明：本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施，给出了详细的实施方式和具体的操作过程。应当指出的是，对本领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些都属于本发明的保护范围。

实施例 1：三电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法，包括下列步骤：

步骤（1） 将三电平换流器及其所在电路中的支路和节点分别进行编号，其中接地节点的编号为 0；

步骤（2）将各个电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路，分别用一个等效导纳和一个历史电流源并联的等效模型替换，独立电压源支路用一个等效导纳和一个等效电流源并联的等效模型替换；其中，各个支路的等效导纳计算公式如下：

电阻支路的等效导纳 $Y_{b_R}=\frac{1}{R}$

其中，R 是电阻支路的电阻值；

电感支路的等效导纳 $Y_{b_L}=\frac{\Delta t}{L}$

其中，L 是电感支路的电感值，Δt 是实时仿真的时间步长；

电容支路的等效导纳 $Y_{b_C}=\frac{C}{\Delta t}$

其中，C 是电容支路的电容值；

所述的开关支路，即三电平换流器中的开关支路，用一个等效导纳和一个历史电流源并联的等效模型替换，开关支路在导通状态下和关断状态下采用相同的等效导纳，即开关支路的等效导纳为： $Y_{b_sw}=\sqrt{\frac{C_{dc}}{L_{ac}}}$

其中，C_{dc} 是三电平换流器直流侧的电容，L_{ac} 是三电平换流器交流侧的电感；

独立电压源支路的等效导纳 $Y_{b_Vs}=\frac{1}{R_s}$

其中，R_s 是独立电压源支路的内电阻；

步骤（3）根据各个支路的等效导纳，计算被仿真电路的节点导纳矩阵；

步骤（4）如果当前仿真时刻t是仿真初始时刻，则电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的历史电流源大小取零，独立电压源支路的等效电流另外计算，如果当前仿真时刻t不是仿真初始时刻，则根据上一仿真时刻电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的支路电压和支路电流，计算出当前仿真时刻电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的历史电流源大小，独立电压源支路的等效电流另外计算；其中，各个支路的历史电流和等效电流的计算公式如下：

电阻支路的历史电流 $I_{h_R}=0$；

电感支路的历史电流 $I_{h_L}(t)=i_L(t-\Delta t)$

其中，$i_L(t-\Delta t)$是上一仿真时刻电感支路的支路电流；

电容支路的历史电流 $I_{h_C}(t)=-Y_{b_C}u_C(t-\Delta t)$

其中，$u_C(t-\Delta t)$是电容支路上一仿真时刻的支路电压，Y_{b_C}是电容支路的等效导纳；

导通时，开关支路的历史电流 $I_{h_sw}(t)=-5.04Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$

关断时，开关支路的历史电流 $I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-0.39i_{sw}(t-\Delta t)$

其中，$u_{sw}(t-\Delta t)$是上一仿真时刻开关支路的支路电压，$i_{sw}(t-\Delta t)$是上一仿真时刻开关支路的支路电流，Y_{b_sw}是开关支路的等效导纳；

独立电压源支路的等效电流源 $I_{s_Vs}(t)=\dfrac{V_s(t)}{R_s}$

其中，$V_s(t)$是独立电压源支路的内电势大小，R_s是独立电压源支路的内电阻大小；

步骤（5）根据当前仿真时刻的历史电流源和等效电流源的大小，计算流入各个节点的注入电流大小；

步骤（6）根据流入各个节点的注入电流，结合节点导纳矩阵，计算出各个节点的电压大小；

步骤（7）根据各个节点的电压，结合各个支路等效模型的等效导纳，计算出各个支路的支路电压和支路电流；

步骤（8）如果没有到达最后的仿真时刻，则返回步骤（4），进入下一仿真时刻$t+\Delta t$，否则结束。

为便于理解，下面将以一个如图 5 所示的单相三电平换流器的简单电路为具体应用实例，对本发明上述实施例进一步阐述，但不应以此限制本发明的保护范围。

在具体实现该三电平换流器的实时仿真时，本具体应用实例中采用如下硬件平台：PXIe 机箱内分别装有美国国家仪器(NI)公司的 PXIe-8135（PXIe 控制器）和 PXIe-7975R（FPGA 模块），PXIe 控制器主要负责换流器控制系统的仿真，FPGA 模块主要负责三电平换流器电路部分的仿真，它们之间通过 PXIe 总线进行通信。此外，PXIe 控制器还可以通过以太网与上位机进行通信，在上位机上显示实时仿真波形，FPGA 模块可以通过 I/O 端口与外置控制器和示波器相连，进行硬件在环仿真。

上位机、PXIe 控制器和 FPGA 模块中的程序都是通过美国国家仪器(NI)公司的 Labview 开发环境进行统一编程。通过 Labview 编程，上位机中的程序完成与 PXIe 控制器的通讯以及仿真波形显示等功能；PXIe 控制器中的程序完成与上位机的通信、从 FPGA 模块中读取和写入数据、模拟换流器的控制系统等功能。上述程序不属于本发明保护范围，且美国国家仪器(NI)公司官网上提供相关的程序范例，故不再详细描述。而 FPGA 模块是本发明的具体实施载体，通过 Labview 编程，参见图 5，图 5 是本一具体应用实例的单相三电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法电路图。

本具体应用实例提供的单相三电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法的实施步骤如下：

(1) 将三电平换流器及其所在电路中的各个支路和节点分别进行编号，如图所 5b 示；

(2) 将各个电阻支路、电感支路、电容支路以及开关支路，分别用一个等效导纳和一个历史电流源并联的如图 1 所示的等效模型替换，独立电压源支路用一个等效导纳和一个等效电流源并联的等效模型替换，仿真步长取$1\mu s$，则各个支路的等效导纳如下：

支路 1（独立电压源支路）$Y_{b_Vs}=\frac{1}{0.1}=10\Omega^{-1}$

支路 2（电容支路）$Y_{b_Cdc1}=\frac{2e-3}{1e-6}=2000\Omega^{-1}$

支路 3（电容支路）$Y_{b_Cdc2}=\frac{2e-3}{1e-6}=2000\Omega^{-1}$

支路 4（开关支路）$Y_{b_sw1}=\sqrt{\frac{2e-3}{50e-3}}=0.2\Omega^{-1}$

支路 5（开关支路）$Y_{b_sw2}=\sqrt{\frac{2e-3}{50e-3}}=0.2\Omega^{-1}$

支路 6（开关支路）$Y_{b_sw3}=\sqrt{\frac{2e-3}{50e-3}}=0.2\Omega^{-1}$

支路 7（电感支路）$Y_{b_L}=\frac{1e\text{-}6}{50e-3}=2e-4\,\Omega^{-1}$

支路 8（电阻支路）$Y_{b_R}=\frac{1}{10}=0.1\Omega^{-1}$

计算得到的各个支路的等效导纳值也标注在图 5b 中；

(3) 根据各个支路的等效导纳，计算被仿真电路的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_n$

$$\mathbf{Y}_n=\begin{bmatrix}2010.2 & -10 & -0.2 & 0\\ -10 & 2010.2 & -0.2 & 0\\ -0.2 & -0.2 & 0.6002 & -2e\text{-}4\\ 0 & 0 & -2e\text{-}4 & 0.1002\end{bmatrix}$$

（4.0）当前仿真时刻 $t=0\,\mu s$，是仿真初始时刻，则电阻支路、电感支路、电容支路以及开关支路的历史电流源大小取零，独立电压源支路的等效电流另外计算，即：

支路 1（独立电压源支路）$I_{s_Vs}=\frac{750}{0.1}=7500\,\mathrm{A}$

支路 2（电容支路）$I_{h_Cdc1}=0\,\mathrm{A}$

支路 3（电容支路）$I_{h_Cdc2}=0\,\mathrm{A}$

支路 4（关断的开关支路）$I_{h_sw1}=0\,\mathrm{A}$

支路 5（关断的开关支路）$I_{h_sw2}=0\,\mathrm{A}$

支路 6（导通的开关支路）$I_{h_sw3}=0\,\mathrm{A}$

支路 7（电感支路）$I_{h_L}=0\,\mathrm{A}$

支路 8（电阻支路）$I_{h_R}=0\,\mathrm{A}$

（5.0）根据当前仿真时刻的历史电流源和等效电流源的大小，计算流入各个节点的注入电流大小（流入为正，流出为负）：

节点 1 的注入电流 $I_{n1}=7500\,\mathrm{A}$

节点 2 的注入电流 $I_{n2}=-7500\,\mathrm{A}$

节点 3 的注入电流 $I_{n3}=0\,\mathrm{A}$

节点 4 的注入电流 $I_{n4}=0\,\mathrm{A}$

（6.0）已知流入各个节点的注入电流，结合节点导纳矩阵，根据节点电压方程 $\mathbf{Y}_n\mathbf{V}_n=\mathbf{I}_n$，计算出各个节点的电压大小：

节点 1 的电压 $V_{n1}=3.7125\,\mathrm{V}$

节点 2 的电压 $V_{n2}=-3.7125\,\mathrm{V}$

节点 3 的电压 $V_{n3}=0\,\mathrm{V}$

节点 4 的电压 $V_{n4}=0\,\mathrm{V}$

（7.0）根据各个节点的电压，结合各个支路的等效导纳，计算出各个支路的支路电压和支路电流：

支路 1（独立电压源支路）$V_{b_Vs}=7.4250\,\mathrm{V}, I_{b_Vs}=7.4257\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 2（电容支路）$V_{b_Cdc1}=3.7125\,\mathrm{V}, I_{b_Cdc1}=7.4250\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 3（电容支路）$V_{b_Cdc2}=3.7125\,\mathrm{V}, I_{b_Cdc2}=7.4250\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 4（开关支路）$V_{b_sw1}=3.7125\,\mathrm{V}, I_{b_sw1}=0.7425\,\mathrm{A}$

支路 5（开关支路）$V_{b_sw2}=3.7125\,\mathrm{V}, I_{b_sw2}=0.7425\,\mathrm{A}$

支路 6（开关支路）$V_{b_sw3}=0\,\mathrm{V}, I_{b_sw3}=0\,\mathrm{A}$

支路 7（电感支路）$V_{b_Lac}=0\,\mathrm{V}, I_{b_Lac}=0\,\mathrm{A}$

支路 8（电阻支路）$V_{b_R}=0\,\mathrm{V}, I_{b_R}=0\,\mathrm{A}$

（8.0）当前仿真时刻$t=0\,\mu s$，没有到达最后的仿真时刻，返回步骤（4.0），从而进入下一仿真时刻$t=1\,\mu s$；

进入下一仿真时刻$t=1\,\mu s$：

（4.1）当前仿真时刻$t=1\,\mu s$，不是仿真初始时刻，则根据各个支路上一仿真时刻的支路电压和支路电流，计算出当前仿真时刻各个支路的历史电流源大小，各个支路的历史电流计算和等效电流公式如下：

支路 1（独立电压源支路）$I_{s_Vs}=\dfrac{750}{0.1}=7500\,\mathrm{A}$

支路 2（电容支路）$I_{h_Cdc1}=\text{-}7.4250\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 3（电容支路）$I_{h_Cdc2}=\text{-}7.4250\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 4（关断的开关支路）$I_{h_sw1}=\text{-}0.4529\,\mathrm{A}$

支路 5（关断的开关支路）$I_{h_sw2}=$-0.4529 A

支路 6（导通的开关支路）$I_{h_sw3}=0$ A

支路 7（电感支路）$I_{h_L}=0$ A

支路 8（电阻支路）$I_{h_R}=0$ A

（5.1）根据当前仿真时刻的历史电流源和等效电流源的大小，计算流入各个节点的注入电流大小；

节点 1 的注入电流 $I_{n1}=1.4925\text{e}4$ A

节点 2 的注入电流 $I_{n2}=-1.4925\text{e}4$ A

节点 3 的注入电流 $I_{n3}=0$ A

节点 4 的注入电流 $I_{n4}=0$ A

（6.1）根据流入各个节点的注入电流，结合节点导纳矩阵，计算出各个节点的电压大小；

节点 1 的电压 $V_{n1}=7.3881$ V

节点 2 的电压 $V_{n2}=-7.3881$ V

节点 3 的电压 $V_{n3}=3.6998\text{e-}16$ V

节点 4 的电压 $V_{n4}=7.3847\text{e-}19$ V

（7.1）根据各个节点的电压，结合各个支路的等效导纳，计算出各个支路的支路电压和支路电流；

支路 1（独立电压源支路）$V_{b_Vs}=14.7762$ V, $I_{b_Vs}=7.3522\text{e}3$ A

支路 2（电容支路）$V_{b_Cdc1}=7.3881$ V, $I_{b_Cdc1}=7.3512\text{e}3$ A

支路 3（电容支路）$V_{b_Cdc2}=7.3881$ V, $I_{b_Cdc2}=7.3512\text{e}3$ A

支路 4（开关支路）$V_{b_sw1}=7.3881$ V, $I_{b_sw1}=1.0247$ A

支路 5（开关支路）$V_{b_sw2}=7.3881$ V, $I_{b_sw2}=1.0247$ A

支路 6（开关支路）$V_{b_sw3}=3.6998\text{e-}16$ V, $I_{b_sw3}=7.3995\text{e-}17$ A

支路 7（电感支路）$V_{b_Lac}=3.6924\text{e-}16$ V, $I_{b_Lac}=7.3847\text{e-}20$ A

支路 8（电阻支路）$V_{b_R}=7.3847\text{e-}19\,\mathrm{V}, I_{b_R}=7.3847\text{e-}20\,\mathrm{A}$

（8.1）当前仿真时刻$t=1\mu s$，没有到达最后的仿真时刻，返回步骤(4.1)，从而进入下一仿真时刻$t=2\mu s$；

进入下一仿真时刻$t=2\mu s$：

(4.2) 当前仿真时刻$t=2\mu s$，不是仿真初始时刻，则根据各个支路上一仿真时刻的支路电压和支路电流，计算出当前仿真时刻各个支路的历史电流源大小和等效电流大小……；此处步骤与前述步骤一致，不再赘述；

如上重复步骤(4)~(8)，直到达到最后的仿真时刻，结束仿真程序。

实施结果请参见图 2、图 3 和图 4，图 2、图 3 是本发明上述实施例所提供的方法与传统实时仿真方法结果对比，图 4 是两种方法在不同换流器开关频率下的虚拟功率损耗率。如图 2、图 3 所示，采用本发明上述实施例所提供的方法的实时仿真波形比传统的基于电感电容等效法更贴近理想开关波形，极大地提高了三电平换流器的实时仿真精度。对于理想开关组成的换流器而言，没有虚拟功率损耗，而在传统的基于电感/电容等效的仿真方法下，三电平换流器的虚拟功率损耗随着开关频率的增大而增大，如图 4 所示，在 100kHz 时高达 60%以上，和实际严重不符。在本发明方法下，三电平换流器的虚拟功率损耗基本不随开关频率变化，始终维持在接近零的水平，更加贴近理想开关组成的换流器。

实施例 2：两电平换流器的定导纳建模与实时仿真方法，包括下列步骤：

(1) 将两电平桥式换流器及其所在电路中的支路和节点分别进行编号，如图 8 所示；

(2) 将各个电阻支路、电感支路、电容支路以及开关支路，分别用一个等效导纳和一个历史电流源并联的如图 1 所示的等效模型替换，独立电压源支路用一个等效导纳和一个等效电流源并联的等效模型替换，仿真步长取$1\mu s$，则各个支路的等效导纳如下：

支路 1（独立电压源支路）$Y_{b_Vs}=\dfrac{1}{0.1}=10\,\Omega^{-1}$

支路 2（电容支路）$Y_{b_Cdc1}=\dfrac{2\text{e}-3}{1\text{e}-6}=2000\,\Omega^{-1}$

支路 3（电容支路）$Y_{b_Cdc2}=\dfrac{2\text{e}-3}{1\text{e}-6}=2000\,\Omega^{-1}$

支路 4（开关支路）$Y_{b_sw1}=\sqrt{\dfrac{2\text{e}-3}{50\text{e}-3}}=0.2\,\Omega^{-1}$

支路 5（开关支路）$Y_{b_sw2}=\sqrt{\dfrac{2\text{e}-3}{50\text{e}-3}}=0.2\,\Omega^{-1}$

支路 6（电感支路） $Y_{b_L}=\frac{1e\text{-}6}{50e-3}=2e-4\,\Omega^{-1}$

支路 7（电阻支路） $Y_{b_R}=\frac{1}{10}=0.1\Omega^{-1}$

计算得到的各个支路的等效导纳值也标注在图 8b 中；

(3) 根据各个支路的等效导纳，计算被仿真电路的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y_n}$

$$\mathbf{Y_n}=\begin{bmatrix}2010.2 & -10 & -0.2 & 0\\ -10 & 2010.2 & -0.2 & 0\\ -0.2 & -0.2 & 0.4002 & -2e\text{-}4\\ 0 & 0 & -2e\text{-}4 & 0.1002\end{bmatrix}$$

(4.0)当前仿真时刻 $t=0\,\mu s$，是仿真初始时刻，则所有支路的历史电流源大小取零，独立电压源支路的等效电流另外计算，即：

支路 1（独立电压源支路） $I_{s_Vs}=\frac{750}{0.1}=7500\,\mathrm{A}$

支路 2（电容支路） $I_{h_Cdc1}=0\,\mathrm{A}$

支路 3（电容支路） $I_{h_Cdc2}=0\,\mathrm{A}$

支路 4（开关支路） $I_{h_sw1}=0\,\mathrm{A}$

支路 5（开关支路） $I_{h_sw2}=0\,\mathrm{A}$

支路 6（电感支路） $I_{h_L}=0\,\mathrm{A}$

支路 7（电阻支路） $I_{h_R}=0\,\mathrm{A}$

(5.0) 根据当前仿真时刻的历史电流源和等效电流源的大小，计算流入各个节点的注入电流大小（流入为正，流出为负）：

节点 1 的注入电流 $I_{n1}=7500\,\mathrm{A}$

节点 2 的注入电流 $I_{n2}=-7500\,\mathrm{A}$

节点 3 的注入电流 $I_{n3}=0\,\mathrm{A}$

节点 4 的注入电流 $I_{n4}=0\,\mathrm{A}$

(6.0) 已知流入各个节点的注入电流，结合节点导纳矩阵，根据节点电压方程 $\mathbf{Y_n V_n = I_n}$，

计算出各个节点的电压大小：

节点 1 的电压 $V_{n1}=3.7125\,\mathrm{V}$

节点 2 的电压 $V_{n2}=-3.7125\,\mathrm{V}$

节点 3 的电压 $V_{n3}=0\,\mathrm{V}$

节点 4 的电压 $V_{n4}=0\,\mathrm{V}$

(7.0) 根据各个节点的电压，结合各个支路的等效导纳，计算出各个支路电压和支路电流：

支路 1（独立电压源支路）$V_{b_Vs}=7.4250\,\mathrm{V}, I_{b_Vs}=7.4257\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 2（电容支路）$V_{b_Cdc1}=3.7125\,\mathrm{V}, I_{b_Cdc1}=7.4250\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 3（电容支路）$V_{b_Cdc2}=3.7125\,\mathrm{V}, I_{b_Cdc2}=7.4250\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 4（开关支路）$V_{b_sw1}=3.7125\,\mathrm{V}, I_{b_sw1}=0.7425\,\mathrm{A}$

支路 5（开关支路）$V_{b_sw2}=3.7125\,\mathrm{V}, I_{b_sw2}=0.7425\,\mathrm{A}$

支路 6（电感支路）$V_{b_Lac}=0\,\mathrm{V}, I_{b_Lac}=0\,\mathrm{A}$

支路 7（电阻支路）$V_{b_R}=0\,\mathrm{V}, I_{b_R}=0\,\mathrm{A}$

(8.0) 当前仿真时刻$t=0\,\mu s$，没有到达最后的仿真时刻，返回步骤(4)，从而进入下一仿真时刻$t=1\,\mu s$；

(4.1) 当前仿真时刻$t=1\,\mu s$，不是仿真初始时刻，则根据各个支路上一仿真时刻的支路电压和支路电流，计算出当前仿真时刻各个支路的历史电流源大小，各类支路的历史电流计算公式如下：

支路 1（独立电压源支路）$I_{s_Vs}=\dfrac{750}{0.1}=7500\,\mathrm{A}$

支路 2（电容支路）$I_{h_Cdc1}=-7.4250\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 3（电容支路）$I_{h_Cdc2}=-7.4250\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 4（导通的开关支路）$I_{h_sw1}=2.5351\,\mathrm{A}$

支路 5（关断的开关支路）$I_{h_sw2}=-0.4349\,\mathrm{A}$

支路 6（电感支路）$I_{h_L}=0\,\mathrm{A}$

支路 7（电阻支路）$I_{h_R}=0\,\mathrm{A}$；

(5.1) 根据当前仿真时刻的历史电流源和等效电流源的大小，计算流入各个节点的注入电流大小；

节点 1 的注入电流 $I_{n1}=1.4922\mathrm{e}4\,\mathrm{A}$

节点 2 的注入电流 $I_{n2}=-1.4925\mathrm{e}4\,\mathrm{A}$

节点 3 的注入电流 $I_{n3}=2.9700\,\mathrm{A}$

节点 4 的注入电流 $I_{n4}=0\,\mathrm{A}$；

(6.1) 根据流入各个节点的注入电流，结合节点导纳矩阵，计算出各个节点的电压大小：

节点 1 的电压 $V_{n1}=7.3874\,\mathrm{V}$

节点 2 的电压 $V_{n2}=-7.3874\,\mathrm{V}$

节点 3 的电压 $V_{n3}=7.4213\,\mathrm{V}$

节点 4 的电压 $V_{n4}=0.0148\,\mathrm{V}$；

(7.1) 根据各个节点的电压，结合各个支路的等效导纳，计算出各个支路电压和支路电流：

支路 1（独立电压源支路）$V_{b_Vs}=14.7747\,\mathrm{V}, I_{b_Vs}=7.3523\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 2（电容支路）$V_{b_Cdc1}=7.3874\,\mathrm{V}, I_{b_Cdc1}=7.3497\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 3（电容支路）$V_{b_Cdc2}=7.3874\,\mathrm{V}, I_{b_Cdc2}=7.3497\mathrm{e}3\,\mathrm{A}$

支路 4（开关支路）$V_{b_sw1}=-0.0339\,\mathrm{V}, I_{b_sw1}=2.5283\,\mathrm{A}$

支路 5（开关支路）$V_{b_sw2}=14.8087\,\mathrm{V}, I_{b_sw2}=2.5268\,\mathrm{A}$

支路 6（电感支路）$V_{b_Lac}=7.4065\,\mathrm{V}, I_{b_Lac}=0.0015\,\mathrm{A}$

支路 7（电阻支路）$V_{b_R}=0.0148\,\mathrm{V}, I_{b_R}=0.0015\,\mathrm{A}$；

(8.1) 当前仿真时刻$t=1\,\mu s$，没有到达最后的仿真时刻，返回步骤(4)，从而进入下一仿真时刻$t=2\,\mu s$；

(4.2) 当前仿真时刻$t=2\,\mu s$，不是仿真初始时刻，则根据各个支路上一仿真时刻的支路电压和支路电流，计算出当前仿真时刻各个支路的历史电流源大小……

如上重复步骤(4)~(8),直到达到最后的仿真时刻，结束仿真程序。

以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是，本发明并不局限于上述特定实施方式，本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改，这并不影响本发明的实质内容。

1、一种电力电子换流器的定导纳建模与实时仿真方法，其特征在于，包括如下步骤：

S1，将电力电子换流器及其所在电路中的各个支路和节点分别进行编号，其中接地节点的编号为0；

S2，将各个电阻支路、电感支路、电容支路和电力电子换流器中的开关支路，分别用一个等效导纳和一个历史电流源并联的等效模型替换；独立电压源支路用一个等效导纳和一个等效电流源并联的等效模型替换，计算各个支路等效模型的等效导纳，其中，开关支路等效模型在导通状态下和关断状态下采用相同的等效导纳；

S3，根据各个支路的等效导纳，计算被仿真电路的节点导纳矩阵；

S4，如果当前仿真时刻t是仿真初始时刻，则电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的历史电流源大小取零，独立电压源支路的等效电流另外计算；

如果当前仿真时刻t不是仿真初始时刻，则根据上一仿真时刻电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的支路电压和支路电流，计算出当前仿真时刻电阻支路、电感支路、电容支路和开关支路的历史电流源大小，独立电压源支路的等效电流另外计算；

S5，根据当前仿真时刻的历史电流源和等效电流源的大小，计算流入各个节点的注入电流大小；

S6，根据流入各个节点的注入电流，结合节点导纳矩阵，计算出各个节点的电压大小；

S7，根据各个节点的电压，结合各个支路等效模型的等效导纳，计算出各个支路的支路电压和支路电流；

S8，如果没有到达最后的仿真时刻，则返回S4，进入下一仿真时刻$t+\Delta t$；否则结束。

2、根据权利要求1所述的电力电子换流器的定导纳建模与实时仿真方法，其特征在于，各个支路等效模型的等效导纳计算公式如下：

电阻支路的等效导纳为：$Y_{b_R}=\frac{1}{R}$；其中，R是电阻支路的电阻值；

电感支路的等效导纳为：$Y_{b_L}=\frac{\Delta t}{L}$；其中，$L$是电感支路的电感值，$\Delta t$是实时仿真的时间步长；

电容支路的等效导纳为：$Y_{b_C}=\frac{C}{\Delta t}$；其中，$C$是电容支路的电容值；

开关支路的等效导纳为：$Y_{b_sw}=\sqrt{\frac{C_{dc}}{L_{ac}}}$；其中，$C_{dc}$是电力电子换流器直流侧的电容，$L_{ac}$是电力电子换流器交流侧的电感；

独立电压源支路的等效导纳为：$Y_{b_Vs}=\frac{1}{R_s}$；其中，R_s是独立电压源支路的内电阻。

3、根据权利要求 1 所述的电力电子换流器的定导纳建模与实时仿真方法，其特征在于，

当所述的电力电子换流器是三电平换流器时，历史电流和等效电流的计算公式如下：

电阻支路的历史电流为：$I_{h_R}=0$；

电感支路的历史电流为：$I_{h_L}(t)=i_L(t-\Delta t)$；其中，$i_L(t-\Delta t)$是上一仿真时刻电感支路的支路电流；

电容支路的历史电流为：$I_{h_C}(t)=-Y_{b_C}u_C(t-\Delta t)$；其中，$u_C(t-\Delta t)$是电容支路上一仿真时刻的支路电压，$Y_{b_C}$是电容支路的等效导纳；

导通时，开关支路的历史电流为：$I_{h_sw}(t)=-5.04Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$；关断时，开关支路的历史电流为：$I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-0.39i_{sw}(t-\Delta t)$；其中，$u_{sw}(t-\Delta t)$是上一仿真时刻开关支路的支路电压，$i_{sw}(t-\Delta t)$是上一仿真时刻开关支路的支路电流，$Y_{b_sw}$是开关支路的等效导纳；

独立电压源支路的等效电流源为$I_{s_Vs}(t)=\frac{V_s(t)}{R_s}$；其中，$V_s(t)$是独立电压源支路的内电势大小，$R_s$是独立电压源支路的内电阻大小；

当所述的电力电子换流器是二电平换流器时，历史电流和等效电流的计算公式如下：

电阻支路的历史电流 $I_{h_R}=0$；

电感支路的历史电流 $I_{h_L}(t)=i_L(t-\Delta t)$；其中，$i_L(t-\Delta t)$是上一仿真时刻电感支路的支路电流；

电容支路的历史电流：$I_{h_C}(t)=-Y_{b_C}u_C(t-\Delta t)$；其中，$u_C(t-\Delta t)$是电容支路上一仿真时刻的支路电压，$Y_{b_C}$是电容支路的等效导纳；

导通时，开关支路的历史电流：$I_{h_sw}(t)=\left(-1+\sqrt{2}\right)Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$；

关断时，开关支路的历史电流：$I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)+\left(1+\sqrt{2}\right)i_{sw}(t-\Delta t)$；

或者采用

导通时，开关支路的历史电流 $I_{h_sw}(t)=\left(-1-\sqrt{2}\right)Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$

关断时，开关支路的历史电流 $I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)+\left(1-\sqrt{2}\right)i_{sw}(t-\Delta t)$

其中，$u_{sw}(t-\Delta t)$ 是上一仿真时刻开关支路的支路电压，$i_{sw}(t-\Delta t)$ 是上一仿真时刻开关支路的支路电流，Y_{b_sw} 是开关支路的等效导纳；

独立电压源支路的等效电流源：$I_{s_Vs}(t)=\frac{V_s(t)}{R_s}$

其中，$V_s(t)$ 是独立电压源支路的内电势大小，R_s 是独立电压源支路的内电阻大小。

:

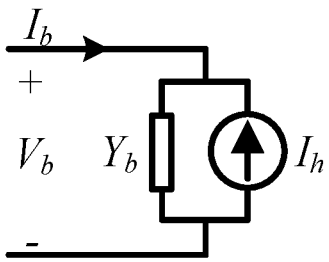

I_b
+
V_b
Y_b
I_h
-

图 1

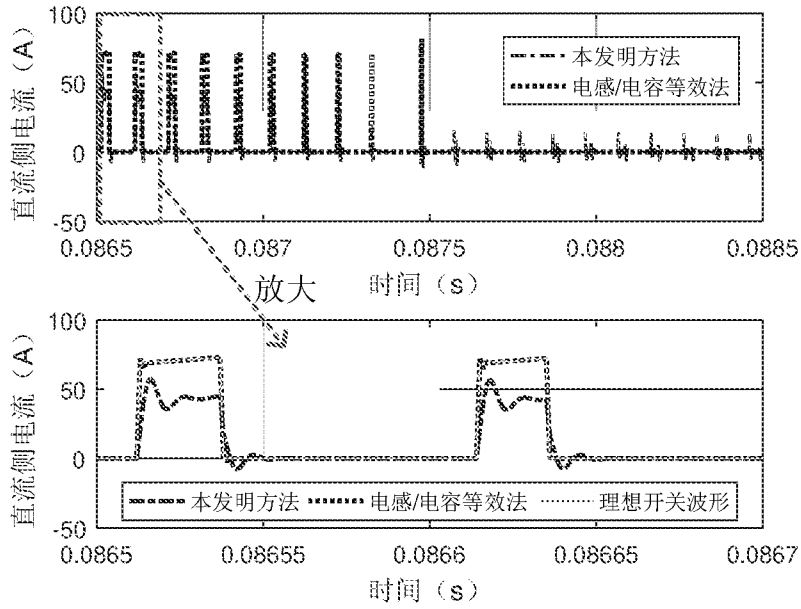

直流侧电流（A）
100
50
0
-50
0.0865
0.087
0.0875
0.088
0.0885
本发明方法
电感/电容等效法
放大
时间（s）
直流侧电流（A）
100
50
0
-50
0.0865
0.08655
0.0866
0.08665
0.0867
本发明方法
电感/电容等效法
理想开关波形
时间（s）

图 2

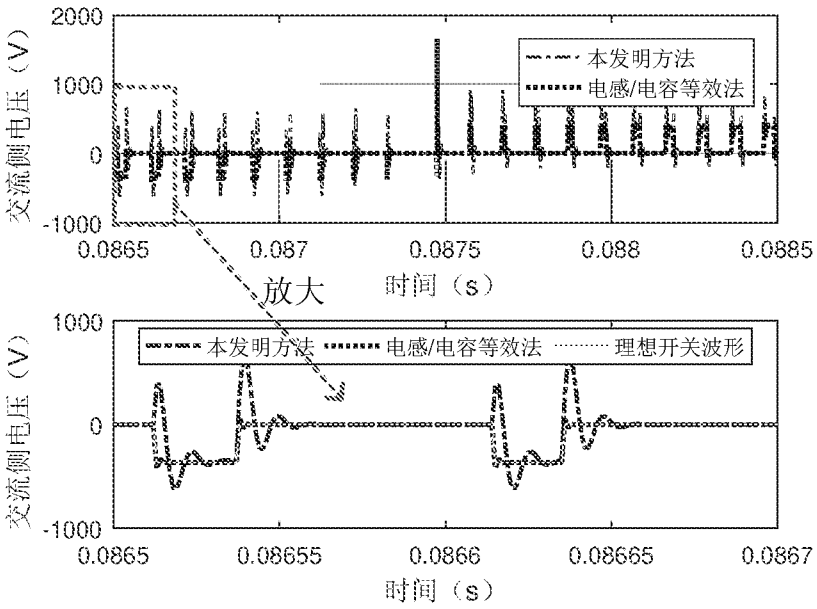

交流侧电压（V）
2000
1000
0
-1000
0.0865
0.087
0.0875
0.088
0.0885
本发明方法
电感/电容等效法
放大
时间（s）
交流侧电压（V）
1000
0
-1000
0.0865
0.08655
0.0866
0.08665
0.0867
本发明方法
电感/电容等效法
理想开关波形
时间（s）

图 3

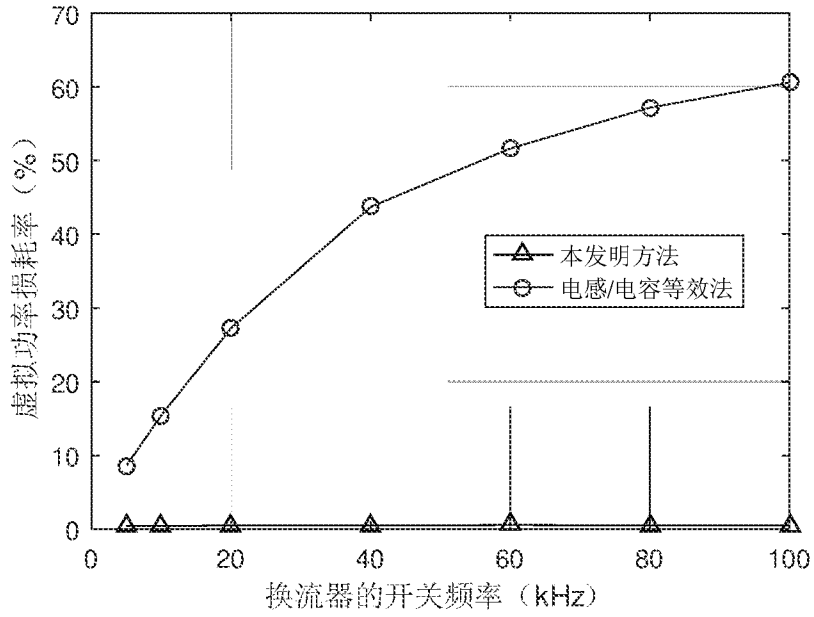

70
60
50
40
30
20
10
0
虚拟功率损耗率（%）
0
20
40
60
80
100
换流器的开关频率（kHz）
本发明方法
电感/电容等效法

图 4

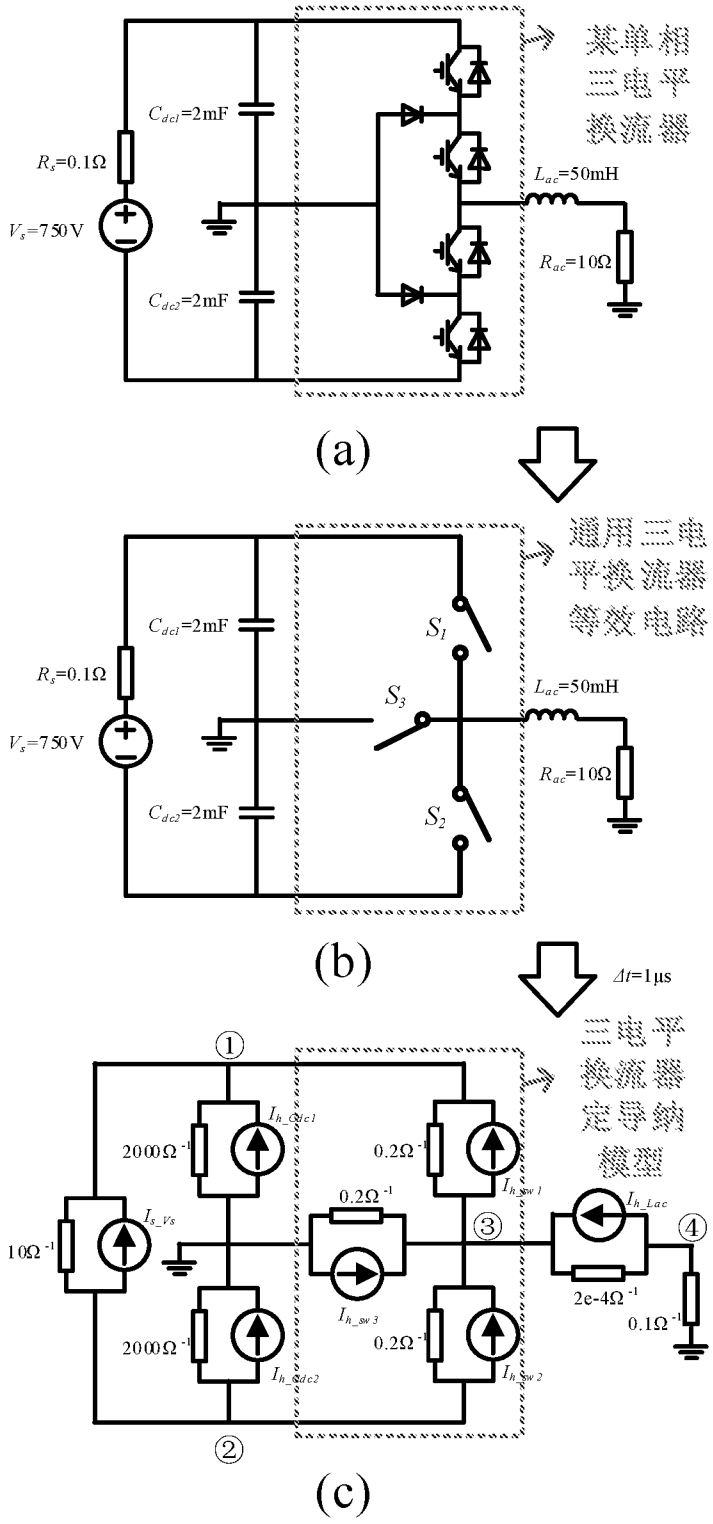

某单相三电平换流器
C_{dc1}=2mF
R_s=0.1Ω
V_s=750V
C_{dc2}=2mF
L_{ac}=50mH
R_{ac}=10Ω
(a)
通用三电平换流器等效电路
S_1
S_3
S_2
(b)
Δt=1μs
三电平换流器定导纳模型
①
②
③
④
I_{h_Cdc1}
I_{h_Cdc2}
I_{s_Vs}
I_{h_sw1}
I_{h_sw2}
I_{h_sw3}
I_{h_Lac}
2000Ω^{-1}
0.2Ω^{-1}
10Ω^{-1}
2e-4Ω^{-1}
0.1Ω^{-1}
(c)

图 5

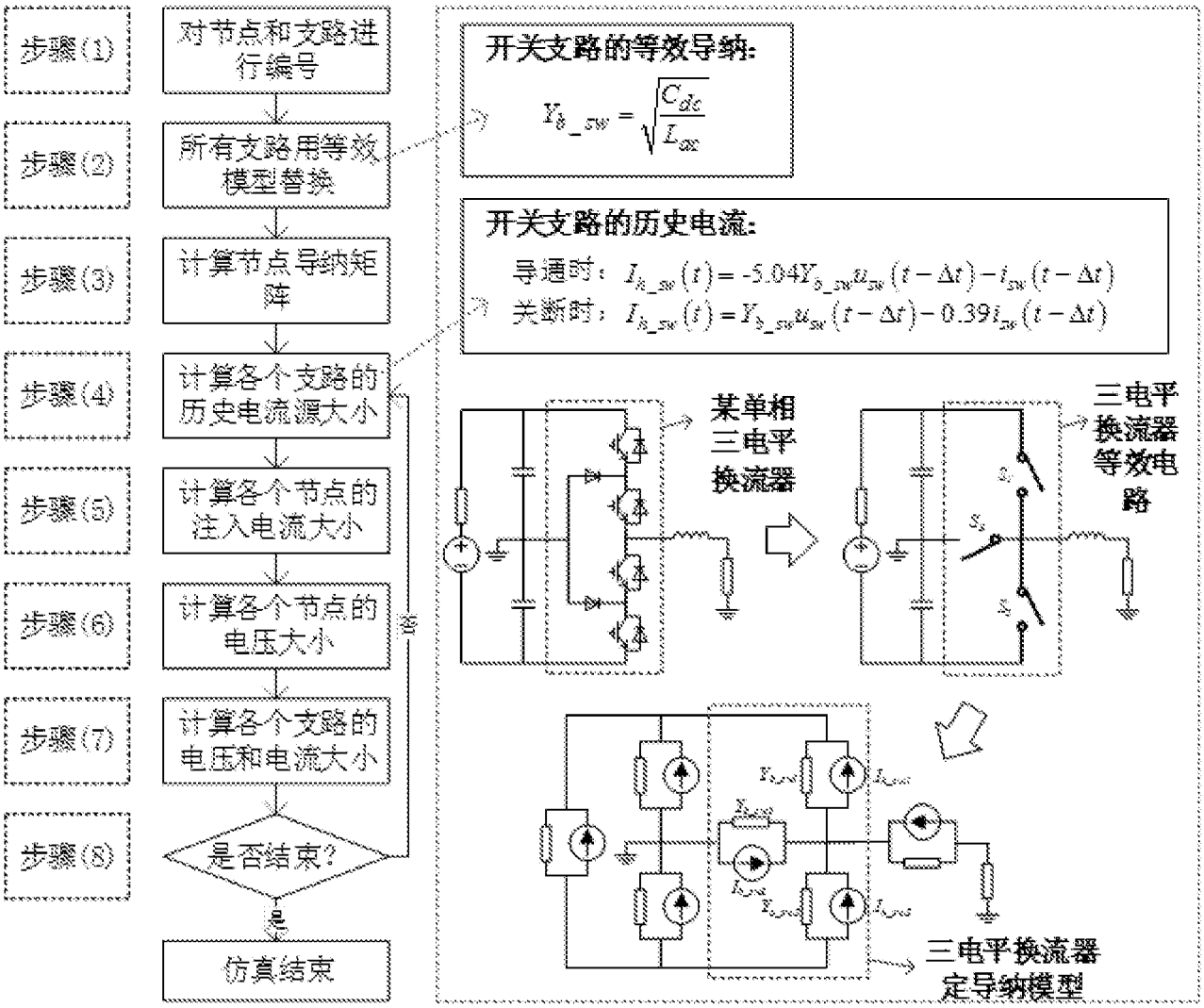

步骤(1)
对节点和支路进行编号
步骤(2)
所有支路用等效模型替换
步骤(3)
计算节点导纳矩阵
步骤(4)
计算各个支路的历史电流源大小
步骤(5)
计算各个节点的注入电流大小
步骤(6)
计算各个节点的电压大小
步骤(7)
计算各个支路的电压和电流大小
步骤(8)
是否结束?
否
是
仿真结束
开关支路的等效导纳:
$Y_{b_sw}=\sqrt{\frac{C_{dc}}{L_{sw}}}$
开关支路的历史电流:
导通时: $I_{h_sw}(t)=-5.04Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$
关断时: $I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-0.39i_{sw}(t-\Delta t)$
某单相三电平换流器
三电平换流器等效电路
三电平换流器定导纳模型

图 6

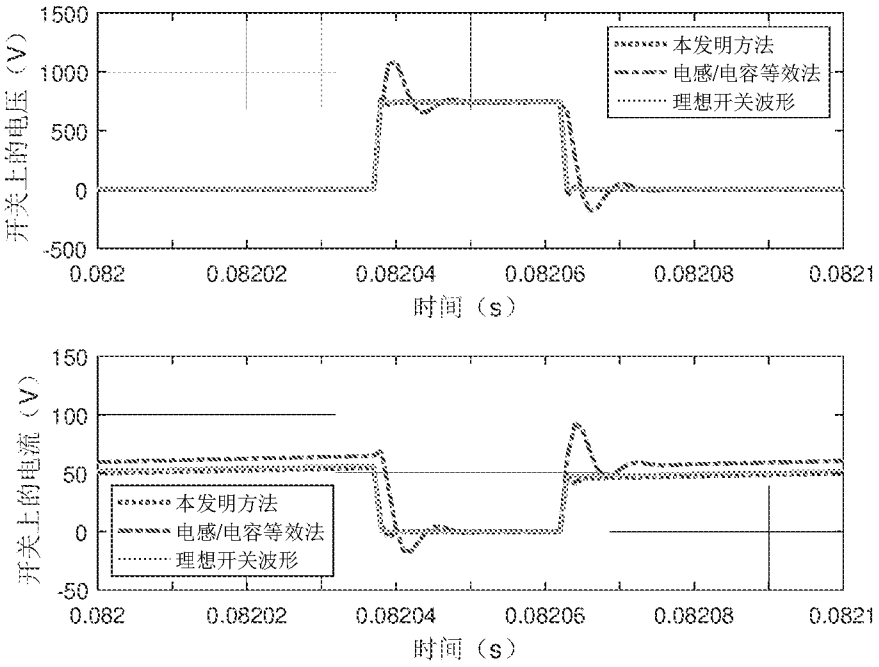
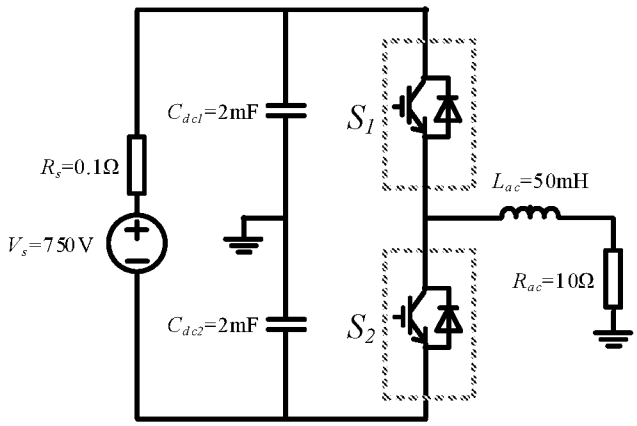
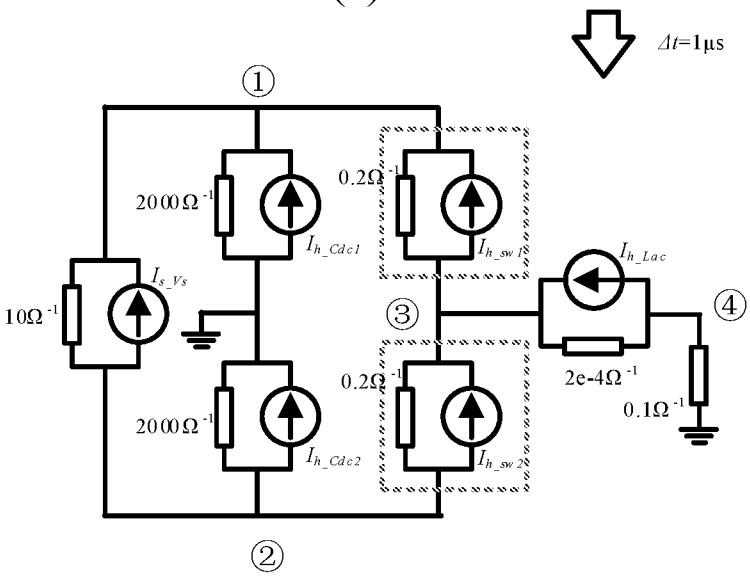

1500
1000
500
0
-500
开关上的电压（V）
0.082
0.08202
0.08204
0.08206
0.08208
0.0821
时间（s）
本发明方法
电感/电容等效法
理想开关波形
150
100
50
0
-50
开关上的电流（V）
0.082
0.08202
0.08204
0.08206
0.08208
0.0821
时间（s）
本发明方法
电感/电容等效法
理想开关波形

图 7


C_{dc1}=2mF
S_1
R_s=0.1Ω
L_{ac}=50mH
V_s=750V
R_{ac}=10Ω
C_{dc2}=2mF
S_2

(a)


Δt=1μs
①
2000Ω^{-1}
0.2Ω^{-1}
I_{h_Cdc1}
I_{h_sw1}
I_{h_Lac}
I_{s_Vs}
10Ω^{-1}
③
④
2e-4Ω^{-1}
0.1Ω^{-1}
0.2Ω^{-1}
2000Ω^{-1}
I_{h_Cdc2}
I_{h_sw2}
②

(b)

图 8

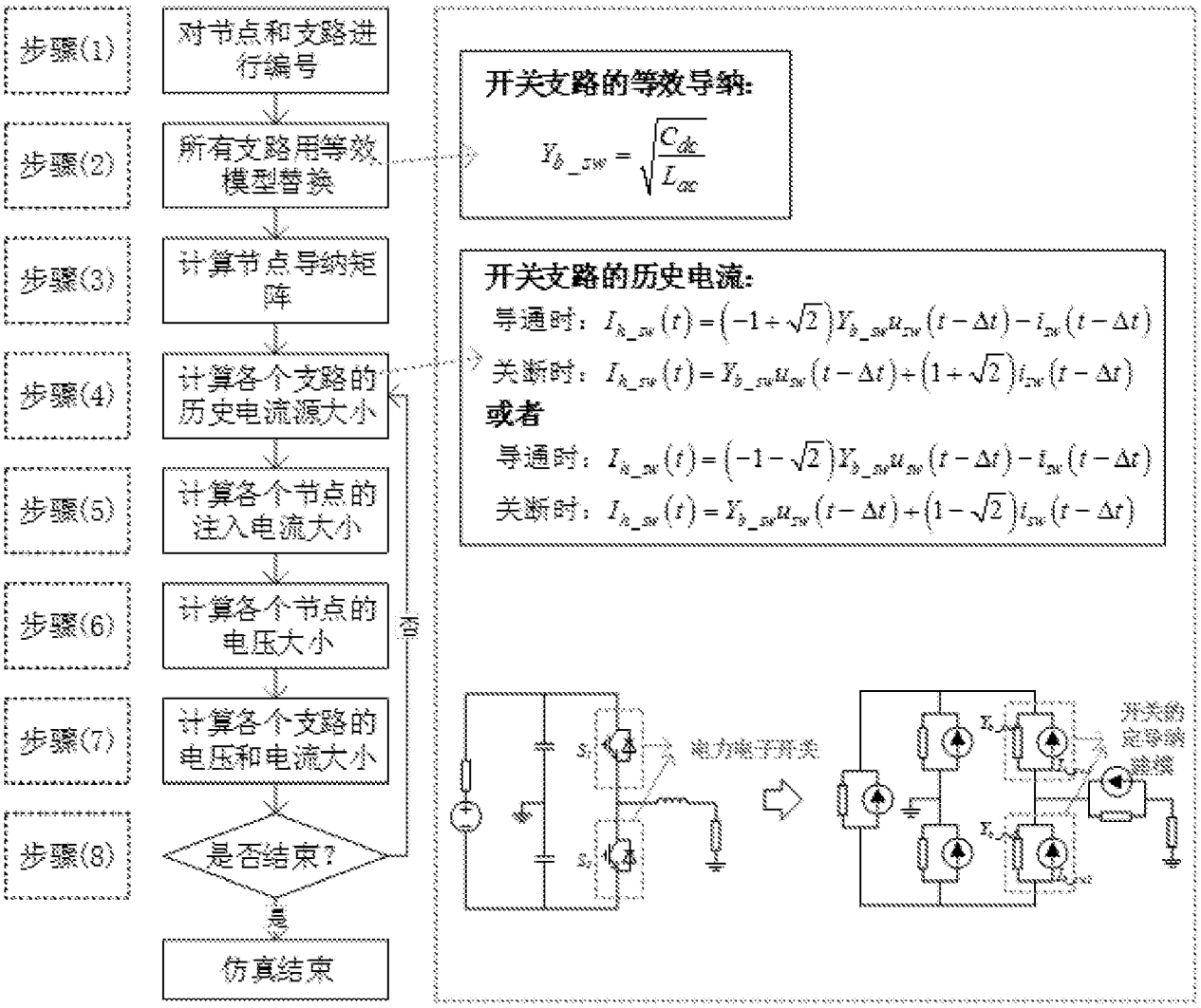

步骤(1)
对节点和支路进行编号
步骤(2)
所有支路用等效模型替换
步骤(3)
计算节点导纳矩阵
步骤(4)
计算各个支路的历史电流源大小
步骤(5)
计算各个节点的注入电流大小
步骤(6)
计算各个节点的电压大小
步骤(7)
计算各个支路的电压和电流大小
步骤(8)
是否结束?
否
是
仿真结束
开关支路的等效导纳:
$Y_{b_sw}=\sqrt{\frac{C_{ak}}{L_{ak}}}$
开关支路的历史电流:
导通时: $I_{h_sw}(t)=\left(-1+\sqrt{2}\right)Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$
关断时: $I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)+\left(1+\sqrt{2}\right)i_{sw}(t-\Delta t)$
或者
导通时: $I_{h_sw}(t)=\left(-1-\sqrt{2}\right)Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)-i_{sw}(t-\Delta t)$
关断时: $I_{h_sw}(t)=Y_{b_sw}u_{sw}(t-\Delta t)+\left(1-\sqrt{2}\right)i_{sw}(t-\Delta t)$
电力电子开关
开关的定导纳模型

图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2019/081194

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50(2006.01)i; G06Q 50/06(2012.01)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)

G06F,G06Q

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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: 上海交通大学, 换流器, 等效导纳, 建模, 节点, 电流, converter, node, simulat+, quivalent w admittance, current

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109543339 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 29 March 2019 (2019-03-29) description, paragraphs [0044]-[0146], and figures 1-6	1-3
A	CN 104091010 A (STATE GRID CORPORATION OF CHINA et al.) 08 October 2014 (2014-10-08) description, paragraphs [0029]-[0041], and figures 1-3	1-3
A	CN 108536949 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 14 September 2018 (2018-09-14) entire document	1-3
A	CN 108133095 A (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, GUANGDONG POWER GRID CORP.) 08 June 2018 (2018-06-08) entire document	1-3
A	CN 107944081 A (NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY) 20 April 2018 (2018-04-20) entire document	1-3
A	US 2014309952 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, INC.) 16 October 2014 (2014-10-16) entire document	1-3

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"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)
"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
"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
"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
"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
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
08 May 2019	**29 May 2019**
Name and mailing address of the ISA/CN **China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)** **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088** **China** Facsimile No. **(86-10)62019451**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2019/081194

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 109543339 A	29 March 2019	None	
CN 104091010 A	08 October 2014	None	
CN 108536949 A	14 September 2018	None	
CN 108133095 A	08 June 2018	None	
CN 107944081 A	20 April 2018	None	
US 2014309952 A1	16 October 2014	JP 2014206532 A	30 October 2014
		JP 6452302 B2	16 January 2019
		US 9835673 B2	05 December 2017

国际检索报告

国际申请号 PCT/CN2019/081194

A. 主题的分类

G06F 17/50(2006.01)i; G06Q 50/06(2012.01)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)

G06F,G06Q

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））

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI:上海交通大学，换流器，等效导纳，建模，节点，电流，converter，node，simulat+，quivalent w admittance，current

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109543339 A (上海交通大学) 2019年 3月 29日 (2019-03-29) 说明书第[0044]-[0146]段，图1-6	1-3
A	CN 104091010 A (国家电网公司 等) 2014年 10月 8日 (2014-10-08) 说明书第[0029]-[0041]段，图1-3	1-3
A	CN 108536949 A (上海交通大学) 2018年 9月 14日 (2018-09-14) 全文	1-3
A	CN 108133095 A (广东电网有限责任公司电力科学研究院) 2018年 6月 8日 (2018-06-08) 全文	1-3
A	CN 107944081 A (华北电力大学) 2018年 4月 20日 (2018-04-20) 全文	1-3
A	US 2014309952 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES, INC.) 2014年 10月 16日 (2014-10-16) 全文	1-3

☐ 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	国际检索报告邮寄日期
2019年 5月 8日	2019年 5月 29日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(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 樊春燕 电话号码 86-(010)-53961286

表 PCT/ISA/210 (第2页) (2015年1月)

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2019/081194

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	109543339	A	2019年 3月 29日	无			
CN	104091010	A	2014年 10月 8日	无			
CN	108536949	A	2018年 9月 14日	无			
CN	108133095	A	2018年 6月 8日	无			
CN	107944081	A	2018年 4月 20日	无			
US	2014309952	A1	2014年 10月 16日	JP	2014206532	A	2014年 10月 30日
				JP	6452302	B2	2019年 1月 16日
				US	9835673	B2	2017年 12月 5日