



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104036066 B

(45)授权公告日 2017.09.22

(21)申请号 201410181139.0

G06F 9/455(2006.01)

(22)申请日 2014.04.30

H02M 7/483(2007.01)

H02M 7/5387(2007.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104036066 A

(56)对比文件

KR 10-2005-0108627 A, 2005.11.07,

CN 102403886 A, 2012.04.04,

US 2012/0314466 A1, 2012.12.13,

江政昕等.模块化多电平换流器直流输电稳态仿真分析.《电气技术》.2011,(第8期),第5-9页.

罗湘等.电压源换流器高压直流输电换流阀的试验方法.《电网技术》.2010,第34卷(第5期),第25-29页.

审查员 王文聪

(43)申请公布日 2014.09.10

(73)专利权人 许继电气股份有限公司

地址 461000 河南省许昌市许继大道1298号

(72)发明人 吴金龙 杨美娟 刘普 韩坤

张浩

(74)专利代理机构 郑州睿信知识产权代理有限公司

41119

代理人 胡泳棋

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

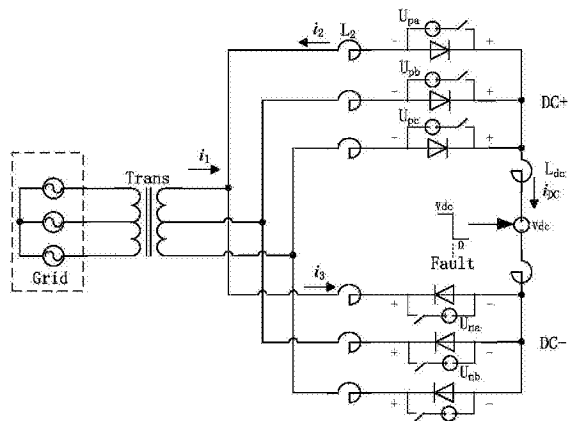
权利要求书1页 说明书4页 附图4页

(54)发明名称

一种半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法

(57)摘要

本发明涉及一种半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,属于电力系统柔性输电和电力电子技术领域.本发明首先建立直流短路工况下半桥式模块化多电平换流器的等效电路,以桥臂等效模块代替多电平环流器的MMC换流阀桥臂,每个桥臂等效由一个可控电压源、一个开关和一个二极管构成,然后对每个桥臂等效模块中的各个元件参数进行配置,对配置后的等效电路模型的直流短路工况进行仿真.避免了使用详细模型需要较长仿真时间的同时,并保持与详细模型在直流短路故障特性方面的高度一致性,且充分估计了直流短路工况下最大电气冲击,为高效快速分析模块化多电平换流器系统直流短路工况过电流情况提供了有效的手段.



1. 一种半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,其特征在于,该仿真方法包括以下步骤:

1) 建立直流短路工况下模块化多电平换流器的等效电路模型,以桥臂等效模块代替多电平换流器的MMC换流阀桥臂,所述的桥臂等效模块由一个可控电压源、一个开关和一个二极管构成;

2) 配置桥臂等效模块中各元件的参数,使所建立的直流短路工况下的模块化多电平换流器等效电路模型与直流短路工况下模块化多电平换流器详细模型具有相同的外部特性;

3) 对配置后的直流短路工况下的模块化多电平换流器的等效电路的直流短路工况进行仿真;

所述的桥臂等效模块的可控电压源的正极与开关的一端连接,开关的另一端与二极管负极连接,连接点构成等效模块的正端口,可控电压源的负极与二极管正极连接,连接点构成等效模块的负端口;

所述桥臂等效模块包括各相上桥臂等效模块和下桥臂等效模块,所述步骤2)中配置的各相上桥臂等效模块中可控电压源电压为 $U_{pk} = U_{dc}/2 - U_{mk}$ ,各相下桥臂等效模块中的可控电压源电压为 $U_{nk} = U_{dc}/2 + U_{mk}$ ,其中 $U_{pk}$ 为上桥臂等效模块中可控电压源的k相电压, $U_{nk}$ 为下桥臂等效模块中可控电压源的k相电压, $U_{mk}$ 为换流器调制峰值的k相电压,k代表A、B、C三相中的任意一相, $U_{dc}$ 为换流器的直流受控电压源电压。

2. 根据权利要求1所述的半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,其特征在于,所述的各相上桥臂等效模块的正端口相连后与直流正母线电抗器一端连接,直流正母线电抗器的另一端与直流受控电压源正极连接;各相下桥臂等效模块的负端口相连后与直流负母线电抗器一端连接,直流负母线电抗器另一端与直流受控电压源负极连接。

3. 根据权利要求2所述的半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,其特征在于,所述的各相上桥臂等效模块的负端口分别与各相上桥臂电抗器的一端相连,各相下桥臂等效模块的正端口分别与各相下桥臂电抗器的一端相连,各相上桥臂电抗器的另一端分别与该相下桥臂电抗器的另一端连接,连接点构成换流器等效电路交流输出端。

4. 根据权利要求1所述的半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,其特征在于,所述步骤2)中配置的每个桥臂等效模块中的二极管通态阻抗 $R_{on}$ 为 $R_{ons} * N$ ,断态阻抗 $R_{off}$ 为 $R_{offs} * N$ ,其中 $R_{ons}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件通态电阻, $R_{offs}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件断态电阻,N为单个桥臂子模块总数。

5. 根据权利要求1所述的半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,其特征在于,所述步骤2)中配置的每个桥臂等效模块中的开关通态阻抗 $R_{son}$ 为 $R_{sons} * N$ ,断态阻抗 $R_{soff}$ 为 $R_{soffs} * N$ ,其中 $R_{sons}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件通态电阻, $R_{soffs}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件断态电阻,N为单个桥臂子模块总数。

6. 根据权利要求1所述的半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,其特征在于,所述步骤3)中的仿真是在MATLAB R2012b Simulink仿真环境下实现的。

## 一种半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,属于电力系统柔性输配电和电力电子技术领域。

### 背景技术

[0002] 随着全控型电力电子器件的发展和电力电子技术在电力系统中的应用,基于电压源换流器的柔性直流输电(VSC-HVDC)技术日益受到重视。模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter)是VSC-HVDC系统中应用的电压源换流器的一种,它由多个半桥或全桥式子模块按照一定的方式连接而成,通过分别控制各个子模块IGBT组件的投入和切除状态使换流器输出的交流电压逼近正弦波,实现能量的高效传输。流短路故障是MMC-HVDC系统最为常见的一种故障,在发生短路时,对于半桥式模块化多电平换流器而言,因为子模块下管反并联二极管的存在,交流电网电动势以及子模块脉冲封锁前的电容电压均通过直流短路点进行放电,鉴于高电压等级的电网电动势和子模块电容电压和以及较小的放电回路阻抗,系统会产生很大的短路电流。而采用详细模型进行仿真,在系统子模块数较大的时候仿真消耗的时间将会很长,会严重影响成套设计的效率。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的是提供一种半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,以解决采用详细模型进行直流短路故障分析的仿真时间过长的的问题。

[0004] 本发明为解决上述技术问题而提供一种半桥式模块化多电平换流器直流短路工况仿真方法,该仿真方法包括以下步骤:

[0005] 1) 建立直流短路工况下模块化多电平换流器的等效电路模型,以桥臂等效模块代替多电平换流器的MMC换流阀桥臂,所述的桥臂等效模块由个可控电压源、一个开关和一个二极管构成;

[0006] 2) 配置桥臂等效模块中各元件的参数,使所建立的直流短路工况下的模块化多电平换流器等效电路模型与直流短路工况下模块化多电平换流器详细模型具有相同的外部特性;

[0007] 3) 对配置后的直流短路工况下的模块化多电平换流器的等效电路的直流短路工况进行仿真。

[0008] 所述的桥臂等效模块的可控电压源的正极与开关的一端连接,开关的另一端与二极管负极连接,连接点构成等效模块的正端口,可控电压源的负极与二极管正极连接,连接点构成等效模块的负端口。

[0009] 所述桥臂等效模块包括各相上桥臂等效模块和下桥臂等效模块,所述的各相上桥臂等效模块的正端口相连后与直流正母线电抗器一端连接,直流正母线电抗器的另一端与直流受控电压源正极连接;各相下桥臂等效模块的负端口相连后与直流负母线电抗器一端连接,直流负母线电抗器另一端与直流受控电压源负极连接。

[0010] 所述的各相上桥臂等效模块的负端口分别与各相上桥臂电抗器的一端相连,各相下桥臂等效模块的正端口分别与各相下桥臂电抗器的一端相连,各相上桥臂电抗器的另一端分别与该相下桥臂电抗器的另一端连接,连接点构成换流器等效电路交流输出端。

[0011] 所述步骤2)中配置的各相上桥臂等效模块中可控电压源电压为 $U_{pk}=U_{dc}/2-U_{mk}$ ,各相下桥臂等效模块中的可控电压源电压为 $U_{nk}=U_{dc}/2+U_{mk}$ ,其中 $U_{pk}$ 为上桥臂等效模块中可控电压源的k相电压, $U_{nk}$ 为下桥臂等效模块中可控电压源的k相电压, $U_{mk}$ 为换流器调制峰值的k相电压,k代表A、B、C三相中的任意一相, $U_{dc}$ 为换流器的直流受控电压源电压。

[0012] 所述步骤2)中配置的每个桥臂等效模块中的二极管通态阻抗 $R_{on}$ 为 $R_{ons}*N$ ,断态阻抗 $R_{off}$ 为 $R_{offs}*N$ ,其中 $R_{ons}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件通态电阻, $R_{offs}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件断态电阻,N为单个桥臂子模块总数。

[0013] 所述步骤2)中配置的每个桥臂等效模块中的开关通态阻抗 $R_{son}$ 为 $R_{ons}*N$ ,断态阻抗 $R_{soff}$ 为 $R_{offs}*N$ ,其中 $R_{ons}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件通态电阻, $R_{offs}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件断态电阻,N为单个桥臂子模块总数。

[0014] 所述步骤3)中的仿真是在MATLAB R2012b Simulink仿真环境下实现的。

[0015] 本发明的有益效果是:本发明首先建立直流短路工况下半桥式模块化多电平换流器的等效电路,以桥臂等效模块代替多电平环流器的MMC换流阀桥臂,每个桥臂等效由一个可控电压源、一个开关和一个二极管构成,然后对每个桥臂等效模块中的各个元件参数进行配置,使所建立的等效电路模型与详细模型具有相同的外部特性,对配置后的模块化多电平换流器的等效电路的直流短路工况进行仿真。本发明采用等效后的电路模型代替详细模型进行直流短路工况仿真,避免了使用详细模型需要较长仿真时间的同时,并保持与详细模型在直流短路故障特性方面的高度一致性,且充分估计了直流短路工况下最大电气冲击,为高效快速分析模块化多电平换流器系统直流短路工况过电流情况提供了有效的手段。

## 附图说明

[0016] 图1是模块化多电平换流器详细模型图;

[0017] 图2是模块化多电平换流器直流短路工况的等效电路模型图;

[0018] 图3-a是模块化多电平换流器直流短路工况在Simulink环境下的等效模型;

[0019] 图3-b是A相上桥臂的等效模块示意图;

[0020] 图4是本发明实施例仿真中观测数据的位置示意图;

[0021] 图5是工况1下等效电路模型与详细模型仿真对比图;

[0022] 图6是工况2下等效电路模型与详细模型仿真对比图;

[0023] 图7是工况3下等效电路模型与详细模型仿真对比图。

## 具体实施方式

[0024] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的说明。

[0025] 1. 建立直流短路工况下模块化多电平换流器的等效电路模型,以桥臂等效模块代替多电平换流器的MMC换流阀桥臂。

[0026] 本实施例中采用的直流短路工况下半桥式模块化多电平换流器系统详细模型如

图1所示,包括三相电网、联结变压器、六个桥臂电抗器、六个MMC换流阀桥臂、两个直流电抗器以及一个直流受控电压源。所建立的与该模型对应的换流器直流短路工况的等效电路如图2所示,包括三相电网、联结变压器、六个桥臂电抗器、六个桥臂等效模块、两个直流电抗器以及一个直流受控电压源。每个桥臂电抗器的一端与各自对应的桥臂等效模块的一端串接,每个桥臂电抗器的另一端通过联结变压器接入三相电网,每个桥臂等效模块的另一端通过直流电抗器接入直流受控电压源。其中每个桥臂等效模块由一个可控电压源、一个开关和一个二极管构成,可控电压源的正极与开关的一端连接,开关的另一端与二极管负极连接,连接点构成等效模块的正端口,可控电压源的负极与二极管正极连接,连接点构成等效模块的负端口。两个直流电抗器分别为直流正母线电抗器和直流负母线电抗器,各相上桥臂等效模块的正端口相连后与直流正母线电抗器一端连接,直流正母线电抗器的另一端与直流受控电压源正极连接;各相下桥臂等效模块的负端口相连后与直流负母线电抗器一端连接,直流负母线电抗器另一端与直流受控电压源负极连接;各相上桥臂等效模块的负端口分别与各相上桥臂电抗器的一端相连,各相下桥臂等效模块的正端口分别与各相下桥臂电抗器的一端相连,各相上桥臂电抗器的另一端分别与该相下桥臂电抗器的另一端连接,连接点构成换流器等效电路交流输出端。

[0027] 2. 配置桥臂等效模块中各元件的参数,使所建立的模块化多电平换流器等效电路模型与模块化多电平换流器详细模型具有相同的外部特性。该等效电路中各个参数的配置如下:

[0028] 上桥臂等效模块中可控电压源电压为 $U_{pk} = U_{dc}/2 - U_{mk}$ ,下桥臂等效模块中的可控电压源电压为: $U_{nk} = U_{dc}/2 + U_{mk}$ ,其中 $U_{pk}$ 为上桥臂等效模块中可控电压源的k相电压, $U_{nk}$ 为下桥臂等效模块中可控电压源的k相电压, $U_{mk}$ 为换流器调制峰值的k相电压,k代表A、B、C三相中的任意一相, $U_{dc}$ 为换流器的直流受控电压源电压;等效模块中二极管的通态阻抗 $R_{on}$ 为 $R_{ons} * N$ ,断态阻抗 $R_{off}$ 为 $R_{offs} * N$ ,其中 $R_{ons}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件通态电阻, $R_{offs}$ 为详细模型中单个子模块的IGBT/Diode组件断态电阻,N为单个桥臂子模块总数;等效模块中开关的通态阻抗 $R_{son}$ 为 $R_{ons} * N$ ,断态阻抗 $R_{soff}$ 为 $R_{offs} * N$ 。直流受控电压源电压在模拟故障前为额定直流母线电压,在模拟故障时为0,呈阶跃变化,可通过换流器稳态运行向量图计算所述换流器调制峰值相电压 $U_m$ 的幅值和相对于电网电动势的相位。

[0029] 3. 对配置后的模块化多电平换流器的等效电路的直流短路工况进行仿真。

[0030] 为了验证本发明对于直流短路故障分析的普适性及其与详细模型的一致性,本实施例建立了MATLAB R2012b Simulink仿真环境下13电平双端仿真模型,分三种工况对等效模型和详细模型进行仿真对比。工况1:两模型均空载运行;工况2:两模型均同功率整流运行;工况3:两模型均同功率逆变运行。

[0031] 建立等效电路在Simulink环境下的等效模型,如图3-a所示,其中的等效桥臂模块如图3-b所示,使用SimPowerSystem库中自带的Controlled Voltage Source模块分别代表桥臂内可控电压源和直流侧直流受控电压源,通过稳态相量图计算得到 $U_m$ 幅值和初始相位;使用一个IGBT模块代表等效模块中开关,使用一个Diode模块代表等效模块中二极管,其通态阻抗均设为 $0.001 * 12$ ,断态阻抗均设为 $1e5 * 12$ ;直流母线电压额定值为400kV。仿真中观测数据的位置如图4所示,包括阀侧交流相电压、阀侧交流电流、A相上下桥臂电流以及直流正母线电流。

[0032] 三种工况下,等效电路的故障逻辑为:1)故障前,打开桥臂等效模块中的开关,直流受控电压源为额定直流电压;2)故障时,直流受控电压源电压突跌至0,且同时闭合桥臂等效模块中的开关;3)故障后根据设定的延时情况断开桥臂等效模块中的开关。详细模型的故障逻辑为:1)故障前,系统正常运行;2)故障后根据设定的延时情况对所有子模块进行脉冲封锁。仿真中,设置的故障时刻为0.6s,设定闭锁延时时间为0.001s,通过Step模块控制直流受控电压源和IGBT的状态。

[0033] 图5、6、7分别为工况1、2、3仿真对比波形。纵坐标均采用标么值,由上到下,第一栏为阀侧交流相电压波形,其中黄、紫、兰为详细模型波形,红、绿、蓝为等效电路波形;第二栏为阀侧交流电流波形,其中黄、紫、兰为详细模型波形,红、绿、蓝为等效电路波形;第三栏为换流阀A相上下桥臂电流波形,其中黄、紫为详细模型波形,兰、红为等效电路波形;第四栏为直流正母线输出电流波形,其中黄色为详细模型波形,紫色为等效电路波形。

[0034] 由图5、6、7可以看出,三种工况下,等效模型交流场、阀内部以及直流场的电流冲击与详细模型一致性很高,特别是在故障稳态时完全保持重合。在暂态过程中的冲击电流虽然存在一定偏差,但可以通过对仿真数据预留一定的安全系数,达到充分等效性。

[0035] 可见本发明能够高效的充分估计直流短路工况下最大电气冲击,为高效快速分析模块化多电平换流器系统直流短路工况过电流情况提供了有效的手段。在避免了使用详细模型需要较长仿真时间的同时,能够保持与详细模型在直流短路故障特性方面的高度一致性。

[0036] 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制,所属领域的技术人员阅读本申请后,参照上述实施例对本发明进行的各种修改或变更的行为,均在本发明专利的权利申请要求保护范围之内。

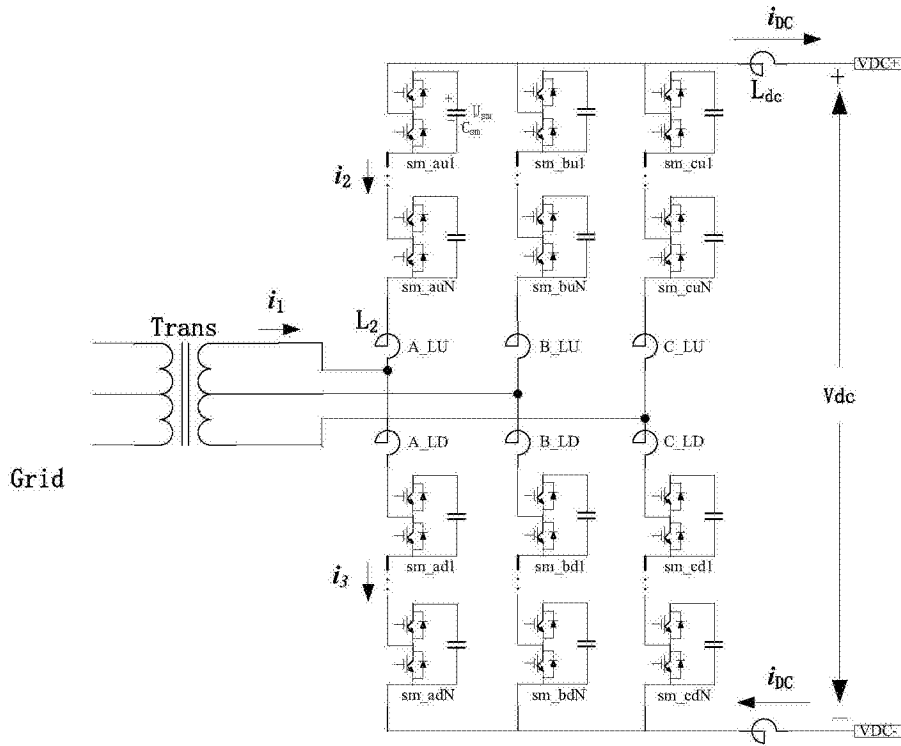


图1

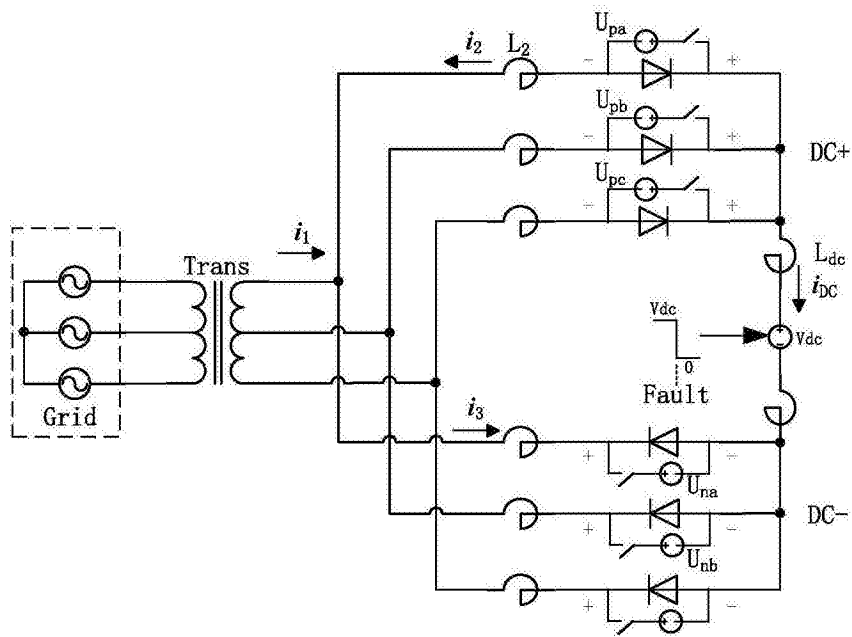


图2

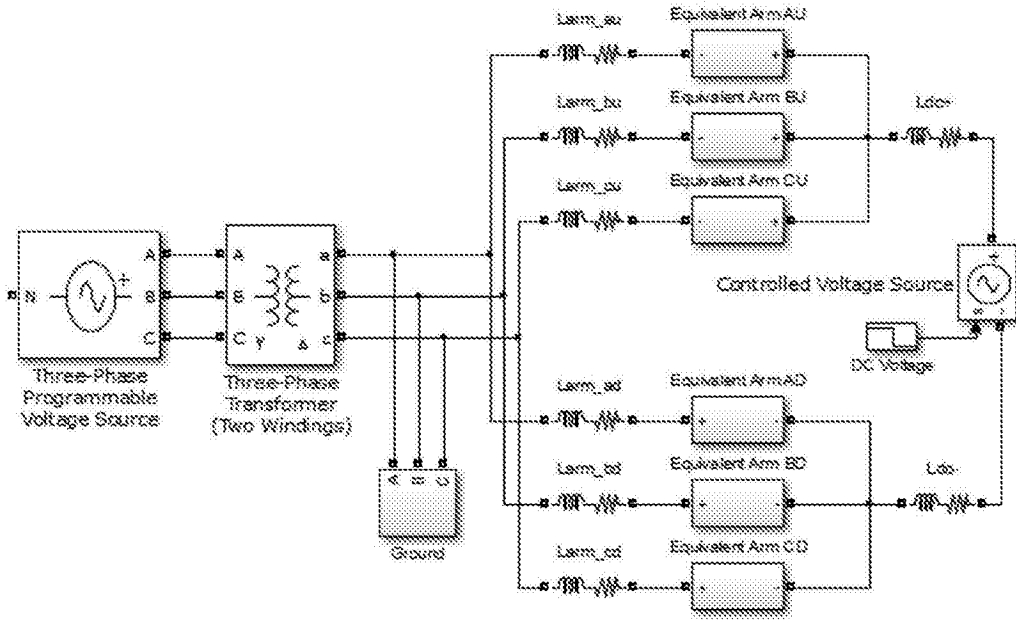


图3-a

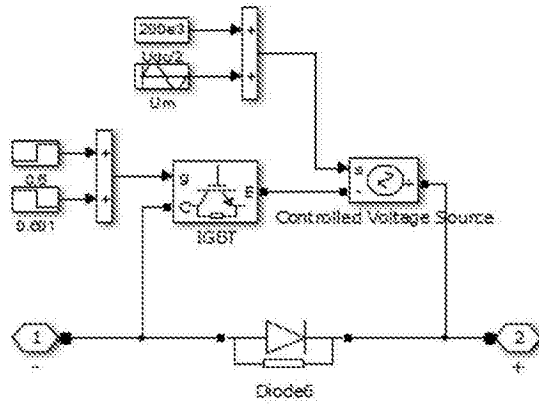


图3-b



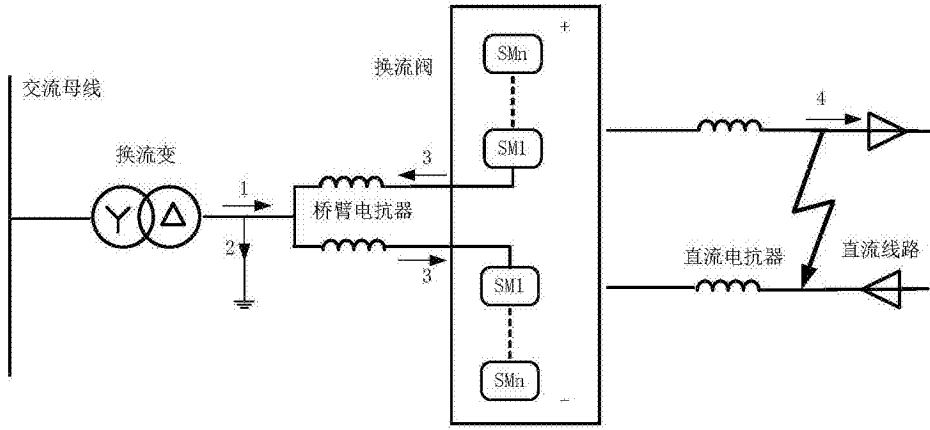


图4

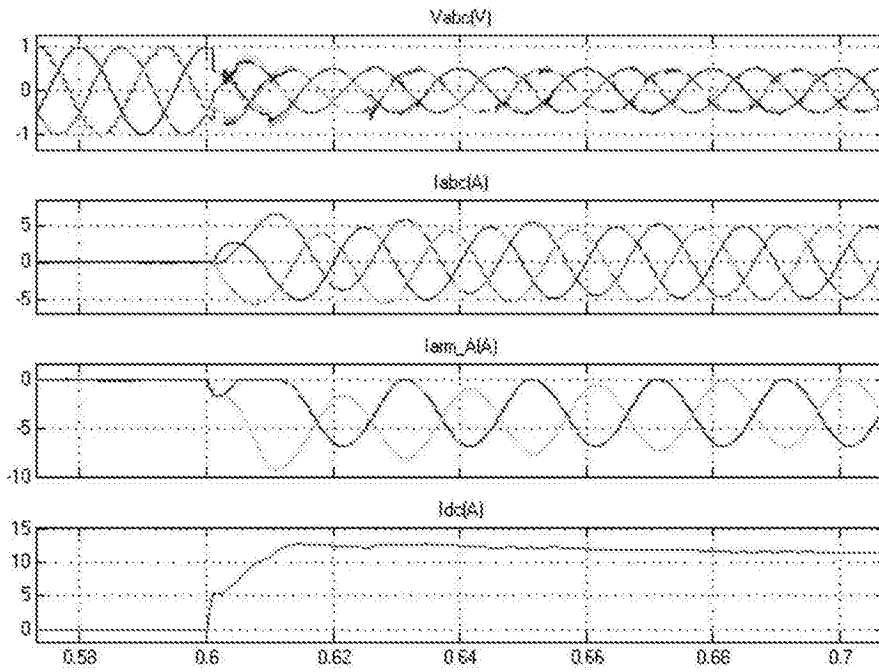


图5

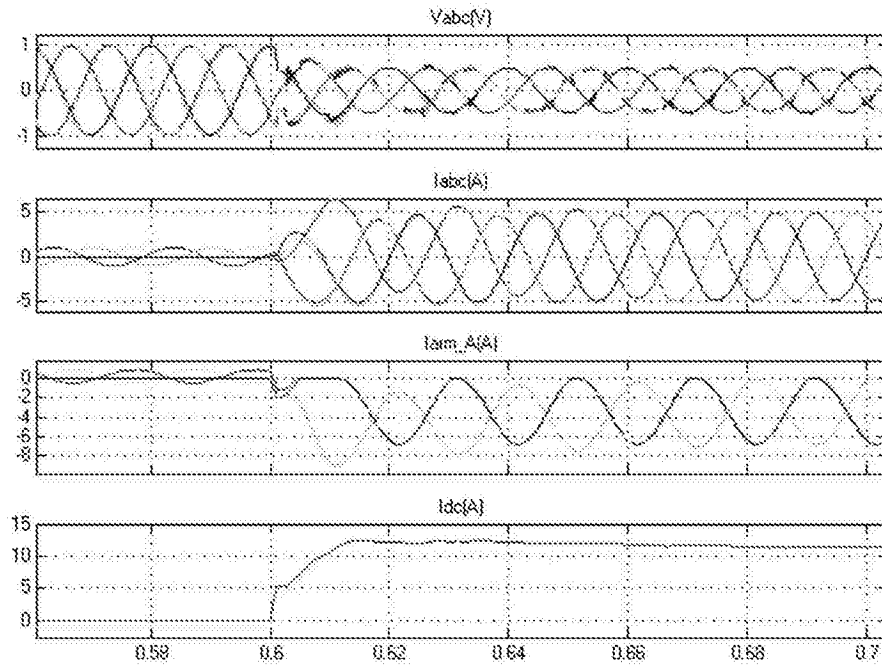


图6

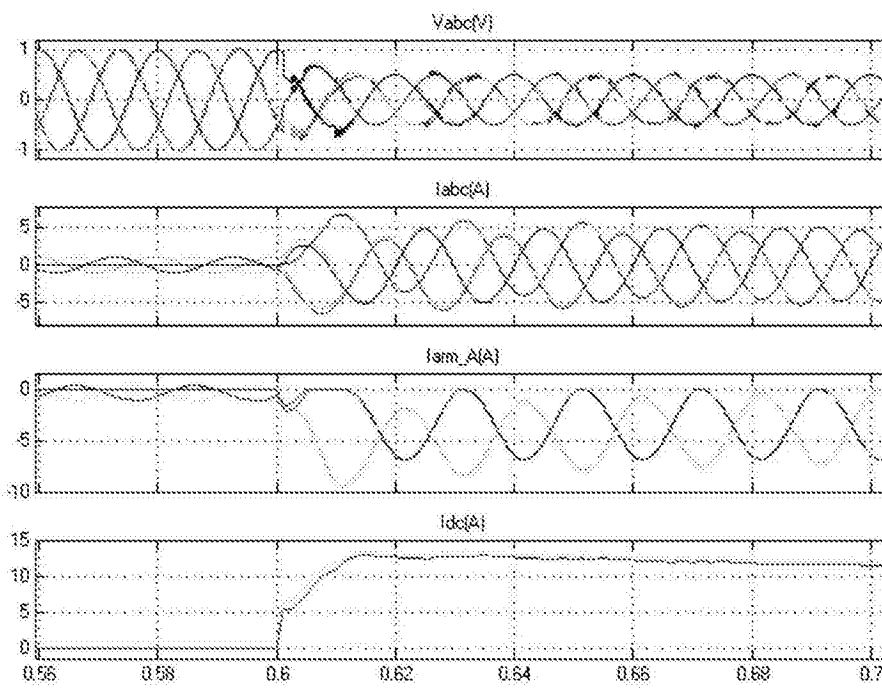


图7