



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105048813 A

(43) 申请公布日 2015. 11. 11

(21) 申请号 201510562364. 3

(22) 申请日 2015. 09. 06

(71) 申请人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037 号

(72) 发明人 林卫星 左文平 文劲宇

(74) 专利代理机构 华中科技大学专利中心
42201

代理人 朱仁玲

(51) Int. Cl.

H02M 3/28(2006. 01)

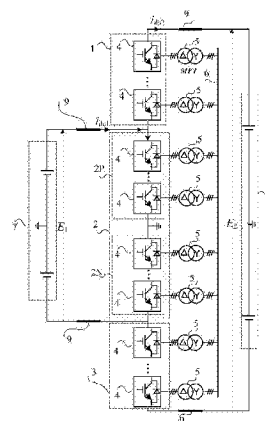
权利要求书2页 说明书10页 附图12页

(54) 发明名称

一种中频直流 - 直流自耦变压器

(57) 摘要

本发明公开了一种中频直流 - 直流自耦变压器,用于互联两个电压等级不同的直流系统,该变压器由第一换流器组、第二换流器组和第三换流器组在直流侧依次串联而成,第一换流器组的正极和第三换流器组的负极分别与第二直流系统的正极和负极联接,第二换流器组的正极和负极分别与第一直流系统的正极和负极相联接,每个换流器组由多个功率单元串联联接而成,每个功率单元经中频交流变压器联接至公共交流母线,第二换流器组可进一步细分为第二换流器正极组和第二换流器负极组从而使得仅包含第一换流器组和第二换流器正极组时,或者仅包含第二换流器负极组和第三换流器组时系统仍能正常运行。



1. 一种中频直流-直流自耦变压器,用于实现电压等级不同的第一直流系统(7)和第二直流系统(8)之间的功率传输,其特征在于,该变压器包括第一换流器组(1)、第二换流器组(2)和第三换流器组(3),其中,第一换流器组(1)的正极和第二直流系统(8)的正极相联接,第一换流器组(1)的负极和第二换流器组(2)的正极相联接,第二换流器组(2)的负极和第三换流器组(3)的正极相联接,第三换流器组(3)的负极和第二直流系统(8)的负极相联接,第二换流器组(2)的正极和负极分别与第一直流系统(7)的正极和负极相联接,所述第一换流器组(1)~第三换流器组(3)分别由多个功率单元串联而成,每个功率单元经其中频交流变压器(5)联接至公共交流母线(6)。

2. 根据权利要求1所述的中频直流-直流自耦变压器,其特征在于,所述第二换流器组(2)进一步地由第二换流器正极组(2P)和第二换流器负极组(2N)串联而得,第二换流器正极组(2P)的负极和第二换流器负极组(2N)的正极相联接,联接点处同时接地。

3. 根据权利要求2所述的中频直流-直流自耦变压器,其特征在于,第二换流器正极组(2P)和第二换流器负极组(2N)的联接点还经过金属回线(10)与第一直流系统(7)或第二直流系统(8)的中性点相联接。

4. 一种中频直流-直流自耦变压器,用于实现电压等级不同的第一直流系统(7)和第二直流系统(8)之间的功率传输,其特征在于,该中频直流-直流自耦变压器包括第一换流器组(1)和第二换流器正极组(2P),第一换流器组(1)的正极和第二直流系统(8)的正极相联接,第一换流器组(1)的负极和第二换流器正极组(2P)的正极相联接,第二换流器正极组(2P)的负极和第二直流系统(8)的负极相联接,第二换流器正极组(2P)的正极和负极分别与第一直流系统(7)的正极和负极相联接,所述第一换流器组(1)和第二换流器正极组(2P)分别由多个功率单元串联而成,每个功率单元经中频交流变压器(5)联接至公共交流母线(6)。

5. 一种中频直流-直流自耦变压器,用于实现电压等级不同的第一直流系统(7)和第二直流系统(8)之间的功率传输,其特征在于,该中频直流-直流自耦变压器包括第二换流器负极组(2N)和第三换流器组(3),第二换流器负极组(2N)的正极和第二直流系统(8)的正极相联接,第二换流器负极组(2N)的负极和第三换流器组(3)的正极相联接,第三换流器组(3)的负极和第二直流系统(8)的负极相联接,第二换流器负极组(2N)的正极和负极分别与第一直流系统(7)的正极和负极相联接,所述第二换流器负极组(2N)和第三换流器组(3)分别由多个功率单元串联而成,每个功率单元经中频交流变压器(5)联接至公共交流母线(6)。

6. 根据权利要求1至5中任意一项所述的中频直流-直流自耦变压器,其特征在于,公共交流母线(6)可以采用但不局限于单母线、双母线、单母线分段的接线方式。

7. 根据权利要求1至5中任意一项所述的中频直流-直流自耦变压器,其特征在于,所述中频交流变压器可以采用硅钢片铁芯,铁氧体磁芯或非晶硅磁芯。

8. 根据权利要求1至5中任意一项所述的中频直流-直流自耦变压器,其特征在于,所述的功率单元可以为两电平电压源型换流器、箝位型三电平电压源型换流器、或模块化多电平换流器和其他交直流转换装置。

9. 根据权利要求1至5中任意一项所述的中频直流-直流自耦变压器,其特征在于,所有换流器组中,一部分换流器组用于控制公共交流母线(6)的频率和交流电压,另一部分

换流器组用于控制第一直流系统 (7) 和第二直流系统 (8) 之间传输的直流功率。

10. 根据权利要求 1 至 5 中任意一项所述的中频直流 - 直流自耦变压器, 其特征在于, 同第二直流系统 (8) 非接地极直接联接的换流器组中的部分功率模块可由具备阻断直流故障电流能力的子模块替代, 用于当第二直流系统发生直流故障时阻断第一直流系统向第二直流系统故障点提供短路电流的通路, 从而隔离第二直流系统直流故障。

11. 根据权利要求 1 至 5 中任意一项所述的中频直流 - 直流自耦变压器, 其特征在于, 同第二直流系统 (8) 非接地极直接联接的换流器组的功率单元中 MMC 子模块数量可被额外增加, 用于提高换流器组触发脉冲闭锁时的反向耐压, 防止同第二直流系统 (8) 非接地极直接联接的换流器组在第一直流系统发生直流故障时因过电压而损毁。

12. 一种用于实现权利要求 1-5 中任意一项所述的中频直流 - 直流自耦变压器的换流器组中各个功率单元间直流电压均衡的方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

(1) 测量换流器组中所有功率单元的直流电压, 并取其最大值与各功率单元的直流电压之间的差值;

(2) 使用调节器对步骤 (1) 获得的差值进行处理, 并将处理后的值作为对应功率单元的 d 轴电流指令值附加量;

(3) 用功率单元的常规 d 轴电流指令值同该 d 轴电流指令值附加量进行叠加, 以得到最终的 d 轴电流指令值。

一种中频直流 - 直流自耦变压器

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统输配电技术领域,更具体地,涉及一种中频直流 - 直流自耦变压器。

背景技术

[0002] 随着模块化多电平换流器的发展,利用模块化多电平换流器构成直流电网是电力工业界近年来备受关注的热点。各个区域直流电网的互联是一个亟待解决的问题。由于各个区域直流电网功能不同,所采用的技术不同,所建设的年代不同,各个区域直流电网的额定直流电压不会完全一致。为了互联不同电压等级的直流电网,需要采用直流 - 直流变换器。在配电网层面,直流微网也是目前的技术热点之一,互联不同电压等级的直流微网也需要用到直流 - 直流变换器。

[0003] 现有的高压大功率直流 - 直流变换器一般包括直流 - 交流 - 直流变换技术和直流自耦变压器技术两类。直流 - 交流 - 直流变换技术的具体实施方式为建设两个换流器,两个换流器的直流端分别与待互联的第一直流电网和第二直流电网(此处记第一直流电网的额定直流电压低于第二直流电网的额定直流电压)的直流端联接,两个换流器的交流端通过一定的交流电路互联在一起。以第一直流电网向第二直流电网传输功率为例,换流器一先进行直流 / 交流变换把第一直流电网的直流电逆变为交流电,换流器二再进行交流 / 直流变换从而把第一直流电网逆变后的电能再重新整流成直流电馈入到第二直流电网。常规的直流 - 交流 - 直流变换技术所使用的换流器总容量为额定传输功率的 2 倍,从而带来了投资大,运行成本高的缺陷。直流自耦变压器的一种实施方式为建设三个换流器,换流器一~换流器三依次在直流侧串联,换流器一的高压直流端和换流器三的低压直流端分别与第二直流电网的高压直流端和低压直流端联接,换流器二的高压直流端和低压直流端分别与第一直流电网的高压直流端和低压直流端联接,三个换流器的交流侧经一定的相电抗支路或变压器支路联接到一个交流公共母线上,采用上述拓扑后,直流自耦变压器所使用的换流器总容量可大大低于常规的直流 - 交流 - 直流变换技术。

[0004] 然而,现有的直流自耦变压器拓扑结构主要适用于工频(例如 50Hz 或 60Hz)运行场合,存在着所使用的交流变压器体积大,重量大的缺陷,使得现有的直流自耦变压器技术不适合应用于对占地面积和重量有严格限制的场合。为了降低直流自耦变压器的体积和重量,可以将直流变压器运行于中频频率(例如 500Hz),从而可以将交流变压器的占地面积和重量缩小至工频条件下的 10% 左右,大大降低直流自耦变压器的体积和重量,但将现有的直流自耦变压器运行于中频频率存在如下缺陷:现有的直流自耦变压器技术所包含的交流变压器数量较少,若将现有直流自耦变压器技术运行于中频频率则每个中频交流变压器的容量太高,将因材料限制难以被成功制造。现有的常规隔离型中频直流 - 直流变换器由于运行于中频频率,可以减小交流变压器的体积和重量,由于采用模块化串、并联拓扑,可以降低对每个中频交流变压器容量的要求,但是常规隔离型中频直流 - 直流变换器技术需要经过直流 - 交流 - 直流变换,所使用换流器总容量为额定传输功率的 2 倍,存在使用的换

流器容量大、运行损耗高的缺陷。

发明内容

[0005] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明提供了一种模块化中频直流-直流自耦变压器,其目的在于,改进现有直流-直流自耦变压器的运行于中频频率对变压器单体容量要求高,难以被成功制造,以及现有中频直流-直流变换器所使用的换流器总容量大的技术问题,采用模块式结构从而降低了对中频变压器单体容量的需求,同时借鉴了直流-直流自耦变压器的技术从而降低了对换流器总容量的需求。

[0006] 为实现上述目的,按照本发明的一个方面,提供了一种中频直流-直流自耦变压器,用于实现电压等级不同的第一直流系统和第二直流系统之间的功率传输,该变压器包括第一换流器组、第二换流器组和第三换流器组,其中,第一换流器组的正极和第二直流系统的正极相联接,第一换流器组的负极和第二换流器组的正极相联接,第二换流器组的负极和第三换流器组的正极相联接,第三换流器组的负极和第二直流系统的负极相联接,第二换流器组的正极和负极分别与第一直流系统的正极和负极相联接,所述第一换流器组~第三换流器组分别由多个功率单元串联而成,每个功率单元经其中频交流变压器联接至公共交流母线。

[0007] 优选地,所述第二换流器组进一步地由第二换流器正极组和第二换流器负极组串联而得,第二换流器正极组的负极和第二换流器负极组的正极相联接,联接点处同时接地。

[0008] 优选地,第二换流器正极组和第二换流器负极组的联接点还经过金属回线(10)与第一直流系统或第二直流系统的中性点相联接。

[0009] 按照本发明的另一方面,提供了一种中频直流-直流自耦变压器,用于实现电压等级不同的第一直流系统和第二直流系统之间的功率传输,该中频直流-直流自耦变压器包括第一换流器组和第二换流器正极组,第一换流器组的正极和第二直流系统的正极相联接,第一换流器组的负极和第二换流器正极组的正极相联接,第二换流器正极组的负极和第二直流系统的负极相联接,第二换流器正极组的正极和负极分别与第一直流系统的正极和负极相联接,所述第一换流器组和第二换流器正极组分别由多个功率单元串联而成,每个功率单元经中频交流变压器联接至公共交流母线。

[0010] 按照本发明的另一方面,提供了一种中频直流-直流自耦变压器,用于实现电压等级不同的第一直流系统和第二直流系统之间的功率传输,该中频直流-直流自耦变压器包括第二换流器负极组和第三换流器组,第二换流器负极组的正极和第二直流系统的正极相联接,第二换流器负极组的负极和第三换流器组的正极相联接,第三换流器组的负极和第二直流系统的负极相联接,第二换流器负极组的正极和负极分别与第一直流系统的正极和负极相联接,所述第二换流器负极组和第三换流器组分别由多个功率单元串联而成,每个功率单元经中频交流变压器联接至公共交流母线。

[0011] 优选地,公共交流母线可以采用但不局限于单母线、双母线、单母线分段的接线方式。

[0012] 优选地,所述中频交流变压器可以采用硅钢片铁芯,铁氧体磁芯或非晶硅磁芯。

[0013] 优选地,所述的功率单元可以为两电平电压源型换流器、箝位型三电平电压源型换流器、或模块化多电平换流器和其他交直流转换装置。

[0014] 优选地,所有换流器组中,一部分换流器组用于控制公共交流母线的频率和交流电压,另一部分换流器组用于控制第一直流系统和第二直流系统之间传输的直流功率。

[0015] 优选地,同第二直流系统直接联接的换流器组中的部分功率模块可由具备阻断直流故障电流能力的子模块替代,用于当第二直流系统发生直流故障时阻断第一直流系统向第二直流系统故障点提供短路电流的通路,从而隔离第二直流系统直流故障。

[0016] 优选地,同第二直流系统直接联接的换流器组的功率单元中 MMC 子模块数量可被额外增加,用于提高换流器组触发脉冲闭锁时的反向耐压,防止同第二直流系统直接联接的换流器组在第一直流系统发生直流故障时因过电压而损毁。

[0017] 按照本发明的另一方面,提供了一种用于实现上述中频直流-直流自耦变压器的换流器组中各个功率单元间直流电压均衡的方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0018] (1) 测量换流器组中所有功率单元的直流电压,并取其最大值与各功率单元的直流电压之间的差值;

[0019] (2) 使用调节器对步骤(1)获得的差值进行处理,并将处理后的值作为对应功率单元的 d 轴电流指令值附加量;

[0020] (3) 用功率单元的常规 d 轴电流指令值同该 d 轴电流指令值附加量进行叠加,以得到最终的 d 轴电流指令值。

[0021] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比,能够取得下列有益效果:

[0022] (1) 相比于常规的直流-直流自耦变压器技术,本发明的模块化结构可以降低对每个中频交流变压器的额定功率的要求从而降低每个中频变压器的制造难度,使得直流-直流自耦变压器可以运行于中频频率从而降低直流-直流自耦变压器的占地面积,子模块电容,桥臂电感等参数从而降低投资成本;

[0023] (2) 相比于常规的隔离型中频直流-直流变换器,由于本发明仅传输的部分功率需要经过两级交流/直流变换,所需要的换流器总容量大大低于常规中频直流-直流变换器,从而降低了投资成本和运行损耗。

附图说明

[0024] 图 1 是常规隔离型中频直流-直流变换器拓扑。

[0025] 图 2 是根据本发明第一实施方式的中频直流-直流自耦变压器的基本结构图。

[0026] 图 3 是第二换流器组的中性点经金属回线与第一直流系统和第二直流系统的中性点相联接的中频直流-直流自耦变压器。

[0027] 图 4 是根据本发明第二实施方式、仅包含第一换流器组和第二换流器正极组的中频直流-直流自耦变压器。

[0028] 图 5 是根据本发明第三实施方式、仅包含第二换流器负极组和第三换流器组的中频直流-直流自耦变压器。

[0029] 图 6 公共交流母线分为多段的中频直流-直流自耦变压器。

[0030] 图 7 是本发明中功率单元可以采用的各种拓扑,其中(a)两电平电压源型换流器拓扑;(b)箝位型三电平电压源型换流器拓扑;(c)模块化多电平换流器拓扑。

[0031] 图 8 是本发明实施例中公共交流母线的交流电压控制框图。

- [0032] 图 9 是本发明实施例中直流功率控制框图。
- [0033] 图 10 是本发明实施例中功率单元直流电压均衡控制框图。
- [0034] 图 11 是第二直流系统发生直流故障时,故障电流通路示意。
- [0035] 图 12 是第一直流系统发生直流故障时,故障电流通路示意。
- [0036] 图 13 是本发明实施例中系统直流功率响应曲线。
- [0037] 图 14 是本发明实施例中各功率单元功率曲线。
- [0038] 图 15 是第二直流系统发生直流故障时,仿真得到的直流电流曲线和触发脉冲使能信号曲线。
- [0039] 图 16 是第二直流系统发生直流故障时,第一直流系统和第二直流系统的直流电压。
- [0040] 图 17 是第一直流系统发生直流故障时,仿真得到的直流电流曲线和触发脉冲使能信号曲线。
- [0041] 图 18 是第一直流系统发生直流故障时,第一直流系统和第二直流系统的直流电压。

具体实施方式

[0042] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0043] 本发明实施例提供的模块化中频直流-直流自耦变压器主要用于互联两个电压等级不相同的直流系统,实现功率的双向传输,其显著的技术性表现在于使用了自耦技术从而降低了所使用的总的换流器容量,采用模块化结构以降低每个中频变压器额定功率从而降低对中频交流变压器的制造难度,提高了系统的冗余性和可靠性。

[0044] 图 1 是常规隔离型中频直流-直流变换器拓扑示例,该变换器采用模块化的输入侧并联,输出侧串联结构,由于所有传输的有功功率都需要经过两级交流/直流变换,该变换器所使用的换流器总容量为传输功率的两倍,从而导致该变换器存在投资成本高,运行损耗高的缺陷。

[0045] 图 2 是本发明所提出的中频直流-直流自耦变压器(中频直流自耦变压器)的基本结构图。该中频直流自耦变主要由第一换流器组 1、第二换流器组 2 和第三换流器组 3 依次串联而成,每个换流器组由多个功率单元 4 串联而成,每个功率单元 4 经中频交流变压器 5 联接至公共交流母线 6,第二换流器组 2 的正极和负极分别经直流线路 9 与第一直流系统 7 的正极和负极联接,第一换流器组 1 的正极以及第三换流器组的负极分别与第二直流系统 8 的正极和负极联接。

[0046] 根据需要,第二换流器组 2 又可进一步分为第二换流器正极组 2P 和第二换流器负极组 2N,2P 的负极和 2N 的正极相联接且联接点接地。将第二换流器组 2 划分为正极组 2P 和负极组 2N 的好处在于,若第一直流系统 7 和第二直流系统 8 为双极性直流系统,当第一直流系统 7 或第二直流系统 8 的正极发生故障时,通过隔离第一换流器组 1 和第二换流器正极组 2P,仅维持第二换流器负极组 2N 和第三换流器组 3 处于运行状态仍能使中频直流自

耦变的非故障部分保持正常运行,同理地若第一直流系统 7 的负极或第二直流系统 8 的负极发生故障时,通过隔离第二换流器负极管 2N 和第三换流器组 3,仅保持第一换流器组 1 和第二换流器正极管 2P 运行仍可以使得非故障部分的第一直流系统 7 和第二直流系统 8 维持功率互送能力。

[0047] 图 3 为中频直流自耦变直流中性点经金属回线 10 分别与第一直流系统和第二直流系统的中性点相联接的中频直流自耦变拓扑。图 3 拓扑与图 2 拓扑基本一致,优点在于不对称运行时(仅第一换流器组 1 和第二换流器正极管 2P 投入运行或仅第二换流器负极管 2N 和第三换流器组 3 投入运行),直流电流无需流经大地,而是经过金属回线 10 构成回路从而避免了直流电流对直流线路 9 沿线金属管道等其他民用设备的腐蚀。

[0048] 图 4 为仅包含第一换流器组 1 和第二换流器正极管 2P 的中频直流自耦变压器,用于互联正极性的不对称单极第一直流系统 7 和第二直流系统 8。该中频直流-直流自耦变压器包括第一换流器组 1 和第二换流器正极管 2P,第一换流器组 1 的正极和第二直流系统 8 的正极相联接,第一换流器组 1 的负极和第二换流器正极管 2P 的正极相联接,第二换流器正极管 2P 的负极和第二直流系统 8 的负极相联接,第二换流器正极管 2P 的正极和负极分别与第一直流系统 7 的正极和负极相联接,所述第一换流器组 1 和第二换流器正极管 2P 分别由多个功率单元串联而成,每个功率单元经中频交流变压器 5 联接至公共交流母线 6。

[0049] 图 5 为仅包含第二换流器负极管 2N 和第三换流器组 3 的中频直流自耦变压器,用于互联负极性不对称单极第一直流系统 7 和负极性不对称单极第二直流系统 8。该中频直流-直流自耦变压器包括第二换流器负极管 2N 和第三换流器组 3,第二换流器负极管 2N 的正极和第二直流系统 8 的正极相联接,第二换流器负极管 2N 的负极和第三换流器组 3 的正极相联接,第三换流器组 3 的负极和第二直流系统 8 的负极相联接,第二换流器负极管 2N 的正极和负极分别与第一直流系统 7 的正极和负极相联接,所述第二换流器负极管 2N 和第三换流器组 3 分别由多个功率单元串联而成,每个功率单元经中频交流变压器 5 联接至公共交流母线 6。

[0050] 为了减少公共交流母线上流过的电流从而减小母线损耗,降低母线制造难度,可以根据运行要求采用多母线并联运行结构、分段母线结构或其余灵活的母线配置方式。图 6 为一种将公共交流母线分为多段的母线联接方式,其中母线段 6a 用于联接第一换流器组 1 和第二换流器正极管 2P 中的部分功率单元 4,使得注入到母线段 6a 的电流之和为零,同理地,母线段 6b~6d 的联接方式类似,母线段 6a~6d 最后会经过一定的直流线路联接在一起。

[0051] 图 7 给出了每个功率单元 4 可以采用的典型换流器拓扑,分别为图 7(a) 两电平电压源型换流器拓扑、图 7(b) 箝位型三电平电压源型换流器拓扑、图 7(c) 模块化多电平换流器拓扑。其中图 7(c) 的每个子模块 SM 根据需要,可以采用自阻子模块、半桥子模块、全桥子模块、箝位双子模块等多种拓扑形式。图 7 所述及的技术均为行业内公知技术,其技术细节不再赘述。

[0052] 为了维持中频直流自耦变的正常运行,需要维持公共交流母线的交流电压的恒定。一种可行的控制策略是利用第二换流器组 2 的所有功率单元控制公共交流母线的交流电压,利用第一换流器组 1 和第三换流器组 3 控制第一直流系统和第三直流系统之间传输的有功功率。类似地,也可以利用第一换流器组 1 和第三换流器组 3 的所有功率单元控制

公共交流母线的交流电压,利用第一换流器组 2 控制第一直流系统 1 和第二直流系统 2 之间传输的有功功率。

[0053] 图 8 为一种公共交流母线电压控制示例,本发明记逆变方向为电流正方向,该控制器以公共交流母线 d 轴电压参考指令值 (通常设为 1.0) 和标幺化的公共交流母线 d 轴电压实测值 V_{dpu} 之差作为输入,经一定的调节器 (如比例-积分调节器 PI) 后得到第二换流器组 2 所有功率单元的 d 轴电流参考指令值 I_{dref2} 。

[0054] 图 9 所示为直流功率控制示例。其中, P_{dc1} 为实测从第二直流系统 8 向第一直流系统 7 传输的直流功率指令 (单位标幺), P_{ref} 为 P_{dc1} 的指令值。两者的差值通过一定的调节器 (如比例-积分调节器 PI, 比例调节器等) 后得到公共有功电流指令 I_{dref} 。通常情况下,为了保证对称运行,第一换流器组和第三换流器组所有功率单元采用同样的有功电流指令。

[0055] 图 10 为一种功率单元直流电压均衡控制示例,其中 U_{dcpu_x} 为某换流器组中第 x 个功率单元的直流电压, U_{dcMax} 为该换流器组中功率单元直流电压的最大值。由于第一换流器组 1~第三换流器组 3 都分别采用了功率单元在直流侧串联,交流侧并联的联接方式,运行时需要维持各功率单元直流电压的均衡,一种可行的策略为测量该换流器组中所有功率单元的直流电压并取其最大值 U_{dcMax} 与各功率单元的直流电压 U_{dcpu_x} 做差,该差值经一定的调节器 (如比例积分调节器,比例调节器等) 后输出每个功率单元的 d 轴电流指令值附加量,常规控制输出的 d 轴电流指令值减去该 d 轴电流指令值附加量后得到最终的 d 轴电流指令值。

[0056] 根据图 2 所示换流器拓扑,可知第二换流器组 2 的额定直流电压为 E_2 ,第一换流器组 1 和第三换流器组 3 的额定直流电压均为 $(E_2-E_1)/2$ 。

[0057] 记 E_1 向 E_2 传输的额定直流功率为 P_N 。如果忽略损耗,可计算得 E_1 、 E_2 的直流电流为:

$$[0058] \quad i_{dc1} = \frac{P_N}{E_1}, i_{dc2} = \frac{P_N}{E_2} \quad (1)$$

[0059] 流经第二换流器组 2 的直流电流为

$$[0060] \quad i_{VSC2} = i_{dc1} - i_{dc2} = \left(\frac{P_N}{E_1} - \frac{P_N}{E_2} \right) \quad (2)$$

[0061] 由式 (2) 及第二换流器组 2 的额定直流电压,可知流经第二换流器组 2 的直流功率为:

$$[0062] \quad P_{VSC2} = E_1 i_{VSC2} = P_N \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \quad (3)$$

[0063] 式 (3) 为第二换流器组 2 逆变的功率,即由第二换流器组 2 的直流侧传向第二换流器组 2 的交流侧的功率。第二换流器组 2 中每个功率单元额定功率 (P_{pm_VSC2}) 及额定直流电压 (V_{pm_VSC2}) 为:

$$[0064] \quad P_{pm_VSC2} = \frac{P_N}{m} \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) \quad (4)$$

$$[0065] \quad V_{pm_VSC2} = \frac{E_2}{m} \quad (5)$$

[0066] 式 (4)、(5) 中 m 为第二换流器组 2 所包含的功率单元总数。

[0067] 同理可得流经第一换流器组 1 和第三换流器组 3 的整流功率 (分别记为 P_{VSC1} 、 P_{VSC3}) 为

$$[0068] \quad P_{VSC1} = P_{VSC3} = \frac{E_2 - E_1}{2} i_{dc2} = \frac{P_N}{2} \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) \quad (6)$$

[0069] 式 (6) 表明, 流经第一换流器组 1、第三换流器组 3 传输的功率分别为流经第二换流器组 2 的功率的一半。第一换流器组 1 (或第三换流器组 3) 每个功率单元的额定直流功率 ($P_{pmVSC1,3}$) 及额定直流电压 ($V_{pmVSC1,3}$) 为:

$$[0070] \quad P_{pm_VSC1,3} = \frac{P_N}{2n} \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) \quad (7)$$

$$[0071] \quad V_{pm_VSC1,3} = \frac{E_2 - E_1}{2n} \quad (8)$$

[0072] 其中 n 为 VSC1、VSC3 各包含的功率单元总数。

[0073] 式 (4)、(5)、(7)、(8) 为指定了各个换流器组中功率单元数目的情况下, 各个功率单元的额定功率及额定电压的计算方式, 当现有功率单元额定条件难以满足指定需求或有成本要求或其他额外需求时, 可以对功率单元数目进行一定修正, 直至功率单元额定功率及额定电压得以满足最优要求。

[0074] 当指定了功率单元的额定功率及电压的情况下, 可以采用反向运算的方式来得出各个换流器组的功率单元数目, 此时需要优先保证功率单元串联后的总额定电压大于等于换流器组的额定工作电压, 此时如果功率单元的总额定功率小于换流器组的额定功率, 可以考虑提高功率单元额定功率或者增设一台或多台中频自耦变以满足现场需求; 如果此时功率单元的总额定功率大于换流器组的额定功率, 可以考虑对功率单元降低额定功率以降低成本或降额使用以提高可靠性。对于具体的设计实施方式, 可以不局限于以上方法, 依现场条件及要求灵活决定。

[0075] 若中频直流-直流自耦变压器的每个功率单元均采用半桥型 MMC 拓扑, 第二直流系统发生直流故障时, 即使闭锁了所有子模块的全控型电力电子器件触发脉冲, 第一直流系统仍将通过第一换流器组和第三换流器组每个半桥子模块的下部二极管给第二直流系统故障点提供短路电流从而使得第一直流系统的直流电压因第二直流系统的故障而降低, 为此需要将第一换流器组和第三换流器组的部分子模块改造为具备阻断直流故障电流能力的子模块 (例如自阻子模块、全桥子模块或箝位双型子模块等能阻断直流故障电流的子模块); 第一直流系统发生直流故障时, 闭锁所有子模块的全控型电力电子器件触发脉冲可以防止第二直流系统向第一直流系统的故障点提供故障电流, 但此时第二直流系统的直

流电压将施加在第一换流器组和第三换流器组串联构成的回路上,若第一换流器组和第三换流器组串联后提供的反向耐压低于第二直流系统的额定直流电压,第一换流器组和第三换流器组将因过电压问题而损毁,为此当第一换流器组和第三换流器组的反向耐压不够时,需要在第一换流器组和第三换流器组上额外串联子模块以提高第一换流器组和第三换流器组的反向耐压,由于半桥子模块相比于其他子模块具备成本低廉的优点,当第一换流器组和第三换流器组上每相桥臂的子模块反向耐压不够时,优选在第一换流器组和第三换流器组上额外串联半桥子模块以提高第一换流器组和第三换流器组的反向耐压。

[0076] 图 11 为第一换流器组的每个桥臂由半桥子模块和自阻子模块混合串联而成时(为简化绘图,每个桥臂只绘出了一个半桥子模块和一个自阻子模块),第二直流系统发生直流故障时的故障电流通路,第一直流系统将经过半桥子模块的二极管 D2,自阻子模块的 D4-C-D2 向第二直流系统故障点提供短路电流。记自阻子模块的额定电容电压为 V_{cn} ,为了阻断图 11 所示的故障电流通路,第一换流器组每相桥臂的所有自阻子模块的数目应不小于 $E1/(2*V_{cn})$;若每个桥臂由半桥子模块和全桥子模块混合串联而成,且记每个全桥子模块的额定电容电压为 V_{cn} ,则第一换流器组每相桥臂的所有全桥子模块的数目不应小于 $E1/(2*V_{cn})$;若每个桥臂由半桥子模块和箝位双型子模块混合串联而成,且记箝位双型子模块的每个电容的额定电容电压为 V_{cn} ,则第一换流器组每相桥臂的所有全桥子模块的数目不应小于 $E1/(2*V_{cn})$ 。

[0077] 图 12 为第一换流器组的每相桥臂由半桥子模块和自阻子模块混合串联而成时,第一直流系统发生直流故障时的故障电流通路,第二直流系统将经过半桥子模块的 D1-C 和自阻子模块的 D1-C-D3 向第一直流系统故障点提供短路电流。记自阻子模块和半桥子模块的额定电容电压均为 V_{cn} ,为了阻断图 12 所示的故障电流通路,第一换流器组每相桥臂的所有子模块的数目应不小于 $E2/(2*V_{cn})$ 。记变比为 $k = E2/E1$ 。不考虑隔离直流故障电流的要求时,第一换流器组的额定直流电压设计值为 $(E2-E1)/2$,为此,第一换流器组每相桥臂的所有子模块提供的额定子模块电容电压之和为 $(E2-E1)$,当 $k \geq 2$ 时, $(E2-E1) \geq E2/2$,第一直流系统发生直流故障时,闭锁所有全控型电力电子器件的触发脉冲即可防止第二直流系统向第一直流系统故障点提供短路电流,且不会使第一、三换流器组承载过电压。当 $k < 2$ 时, $(E2-E1) < E2/2$,为了防止第一换流器组和第三换流器组因耐压不足而烧毁,需要在第一换流器组和第三换流器组上额外串联子模块以提高第一换流器组和第三换流器组的反向耐压。

[0078] 当中频直流自耦变压器包含第一换流器组、第二换流器组和第三换流器组时,为了使中频直流自耦变压器具备双向直流故障隔离能力,第一、三换流器组每相需包含的可阻断直流故障电流的子模块总数为 $E1/(2V_{cn})$,其中 V_{cn} 为子模块中每个电容的额定直流电压,当变比 $k \geq 2$ 时无需在第一换流器组和第三换流器组上额外串联子模块,当变比 < 2 ,需要在第一、三换流器组上额外串联子模块(推荐为半桥子模块),使得第一、三换流器组每相的子模块额定输出电压之和达到 $E2/2$ 。

[0079] 当中频直流自耦变压器仅包含第一换流器组、第二换流器正极组时,为了使中频直流自耦变压器具备双向直流故障隔离能力,第一换流器组每相需包含的可阻断直流故障电流的子模块总数为 $E1/(V_{cn})$,其中 V_{cn} 为子模块中每个电容的额定直流电压,当变比 $k \geq 2$ 时无需在第一换流器组上额外串联子模块,当变比 < 2 ,需要在第一换流器组上额外串

联子模块（推荐为半桥子模块），使得第一换流器组每相的子模块额定输出电压之和达到 E_2 。

[0080] 当中频直流自耦变压器仅包含第二换流器负极组和第三换流器组时，为了使中频直流自耦变压器具备双向直流故障隔离能力，第三换流器组每相需包含的可阻断直流故障电流的子模块总数为 $E_1/(V_{cn})$ ，其中 V_{cn} 为子模块中每个电容的额定直流电压，当变比 $k \geq 2$ 时无需在第三换流器组上额外串联子模块，当变比 < 2 ，需要在第三换流器组上额外串联子模块（推荐为半桥子模块），使得第三换流器组每相的子模块额定输出电压之和达到 E_2 。

[0081] 为了对模块化中频直流自耦变压器进行技术可行性验证，在国际公认软件 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了中频自耦变压器的仿真算例。算例中，第一直流系统和第二直流系统的额定直流电压分别为 $\pm 320\text{kV}$ 和 $\pm 500\text{kV}$ （即 $E_1 = 640\text{kV}$ ， $E_2 = 1000\text{kV}$ ），额定传输的直流功率为 1000MW 。根据式 (3)、(6) 可得第二换流器组的额定功率为 360MW ，第一及第三换流器组均为 180MW 。

[0082] 假设第二换流器组共包含 4 个功率单元，则每个功率单元的额定直流电压 160kV ，额定功率 90MW 。记第二换流器组每个子模块额定直流电压为 1.6kV ，则第二换流器组每个功率单元的每个桥臂的子模块数为 $160/1.6 = 100$ 。

[0083] 假设第一、三换流器组各包含 2 个功率单元，不考虑直流故障隔离能力时，则第一、三换流器组的每个功率单元额定直流电压 90kV ，额定功率 90MW 。公共交流母线电压额定值取 90kV ，运行频率 500Hz 。

[0084] 假定第一、三换流器组的每个功率单元的每个桥臂均采用自阻子模块和半桥子模块串联而成的结构，且记第一、三换流组每个功率单元的额定直流电压为 1.6kV ，根据前述直流故障保护分析，第一、三换流器组每相桥臂可阻断直流故障电流的子模块额定电压值和为 $E_1/2$ ，为此，第一、三换流器组每相桥臂需包含的自阻子模块的总数取整为 $320/1.6 = 200$ ，由于第一、三换流器组各包含 2 个功率单元，每个功率单元包含多相，每相包括上、下两个桥臂，为此第一、三换流器组每个桥臂的自阻子模块数目为 50。若不考虑对低压直流系统的故障隔离能力，则第一、三换流器组每个桥臂包含的子模块数为 $90/1.6 = 57$ 。由于此测试系统的变比 k 为 1.56 ，小于 2，需要在第一、三换流器组的每个功率单元上额外串联半桥子模块使得第一、三换流器组每相所有子模块的额定直流电压大 500kV ，即第一、三换流器组每个桥臂的子模块数为 $500/4/1.6 = 79$ 个子模块。综合可知，若设计第一、三换流器组的每个功率单元的每个桥臂包含 50 个自阻子模块和 29 个半桥子模块，第二换流器组的每个功率单元的每个桥臂包含 100 个子模块，则该中频直流 - 直流自耦变压器具备双向直流故障隔离能力。

[0085] 仿真实验中，系统在 0.1s 至 0.3s 处于公共交流母线指令爬升阶段，从零压升至额定工作电压，在 0.3s 至 0.5s 由高压侧向低压侧馈送功率，功率指令从零增至额定工作功率， 0.5s 至 1.0s 维持额定工作功率， 1.0s 至 1.2s 功率减小直至反向传输额定功率， 1.2s 至 2.0s 维持低压侧向高压侧输送额定功率， 2.0 至 2.2s 又恢复为高压侧输出额定功率， 2.2s 至 3.0s 维持高压侧输出功率不变。

[0086] 图 13 为系统功率指令跟踪结果， P_{ref} 为功率指令值， P_{dc1} 为第一直流系统输出的直流功率， P_{dc2} 为输入到第二直流系统的功率。从图 13 可以看出中频直流自耦变压器对功率

指令跟踪良好。

[0087] 图 14 为系统在功率跟踪时,第二换流器组各功率单元的功率分配特性,可以看出第二换流器组中各功率单元功率平均分配,系统均衡控制良好,达到了本发明设计目的。

[0088] 图 15 是第二直流系统发生直流故障时,仿真得到的直流电流曲线 ($idc1$, $idc2$) 和触发脉冲使能信号 ($Deb1k$) 曲线。系统检测到直流故障时,全控型电力电子器件的触发脉冲将被闭锁 ($Deb1k$ 从 1 变为 0),由图 15 可知,直流电流在 $Deb1k$ 变为 0 后也能迅速衰减为 0,第二直流系统发生直流故障时不会导致系统出现过电流问题。

[0089] 图 16 是第二直流系统发生直流故障时,第一直流系统和第二直流系统的直流电压,可见第二直流系统发生直流故障时,第二直流系统的直流电压 ($E2$) 降为零,第一直流系统的直流电压 ($E1$) 不受第二直流系统直流故障的影响,基本保持不变。

[0090] 图 17 和图 18 表明第一直流系统发生直流故障时,系统也不存在过电流问题,第二直流系统的直流电压基本维持不变。

[0091] 本发明还公开了一种用于实现上述中频直流-直流自耦变压器的换流器组中各个功率单元间直流电压均衡的方法,包括以下步骤:

[0092] (1) 测量换流器组中所有功率单元的直流电压,并取其最大值与各功率单元的直流电压之间的差值;

[0093] (2) 使用调节器(如比例调节器)对步骤(1)获得的差值进行处理,并将处理后的值作为对应功率单元的 d 轴电流指令值附加量;

[0094] (3) 用功率单元的常规 d 轴电流指令值同该 d 轴电流指令值附加量进行叠加,以得到最终的 d 轴电流指令值。

[0095] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

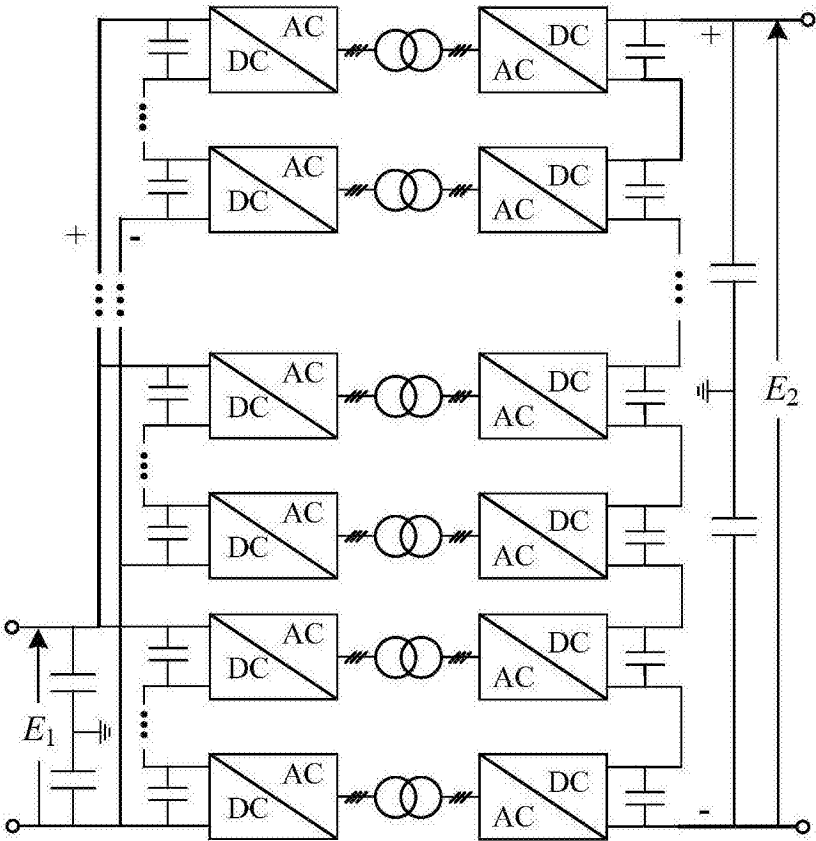


图 1

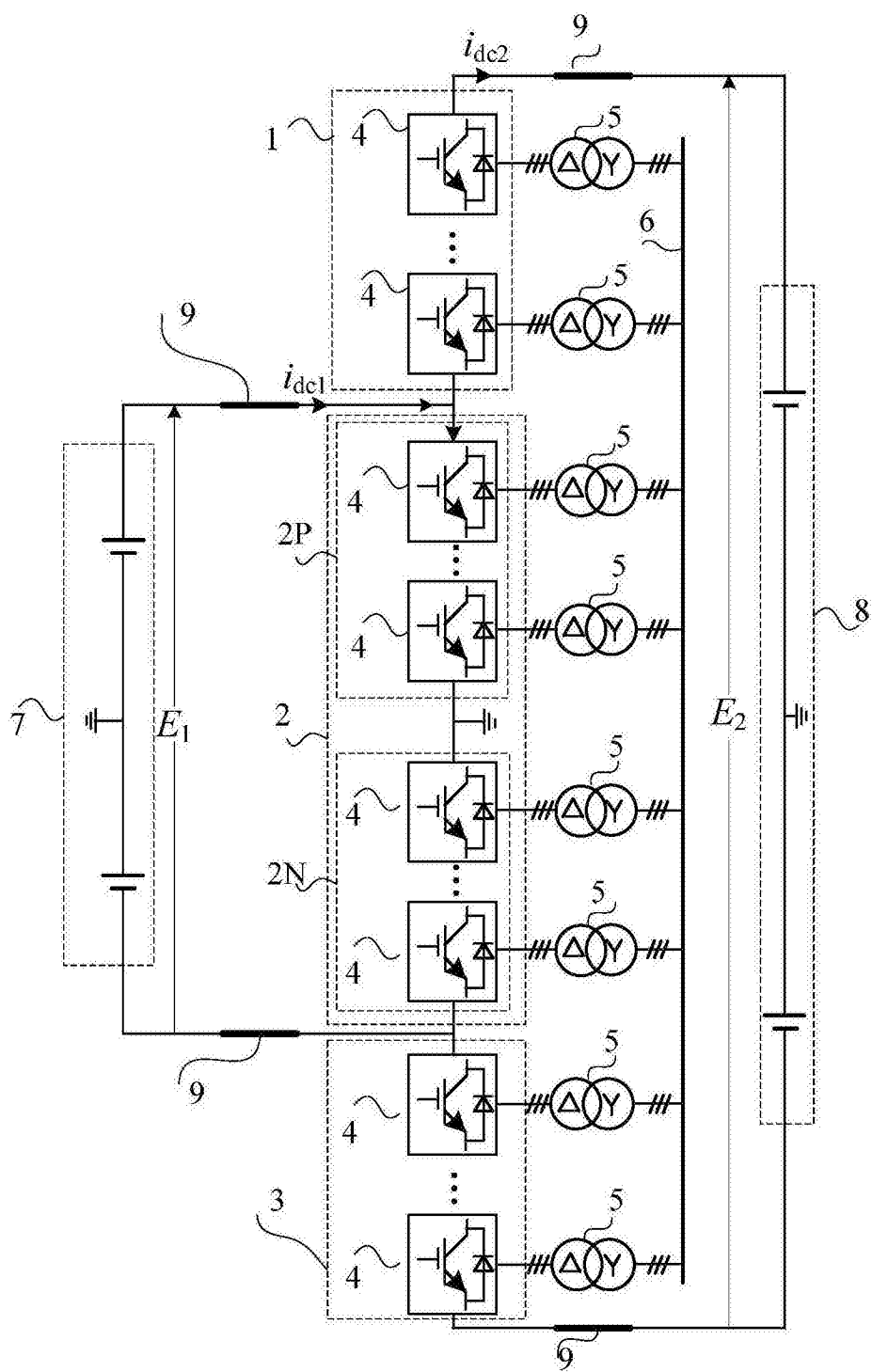


图 2

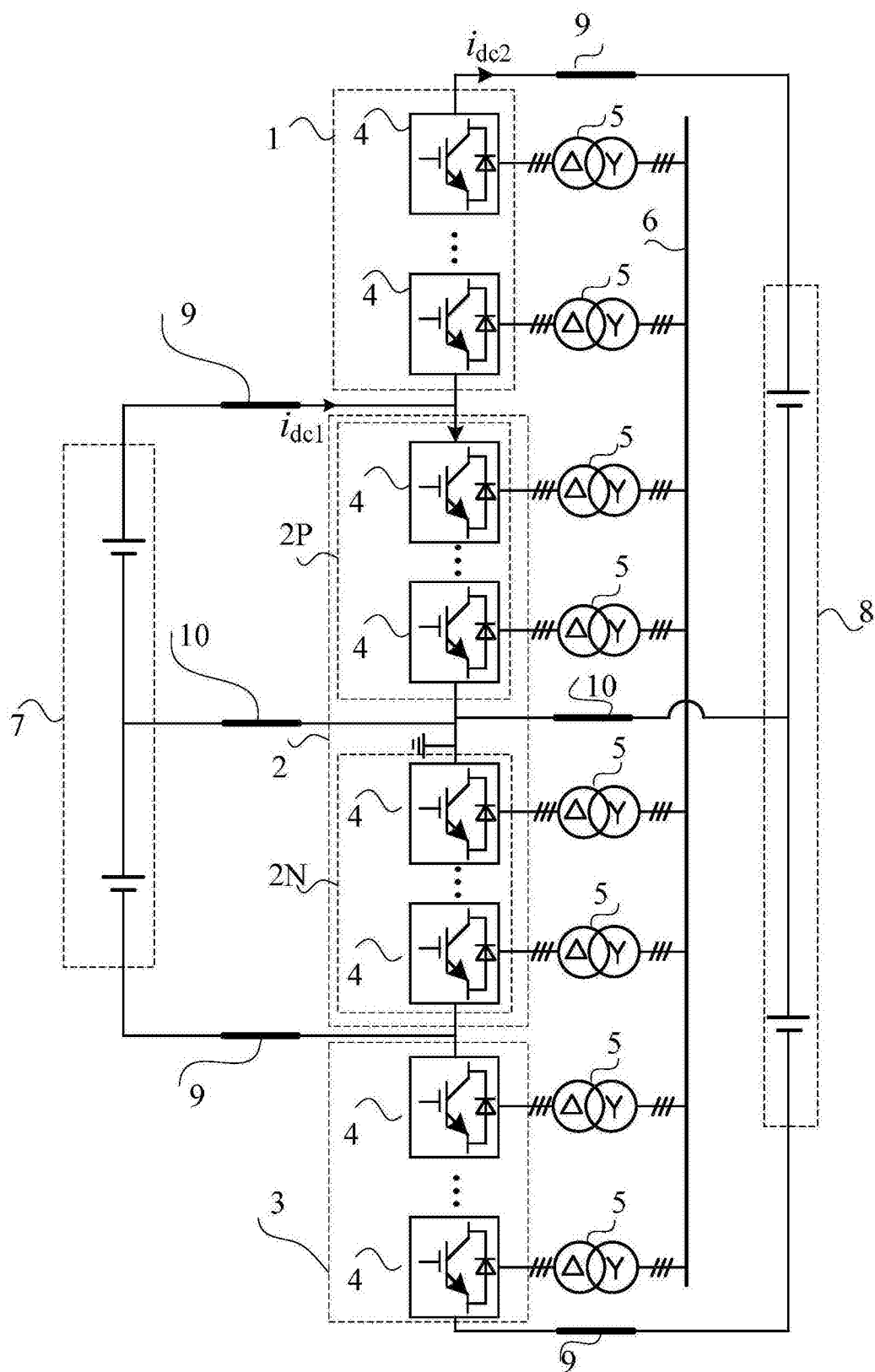


图 3

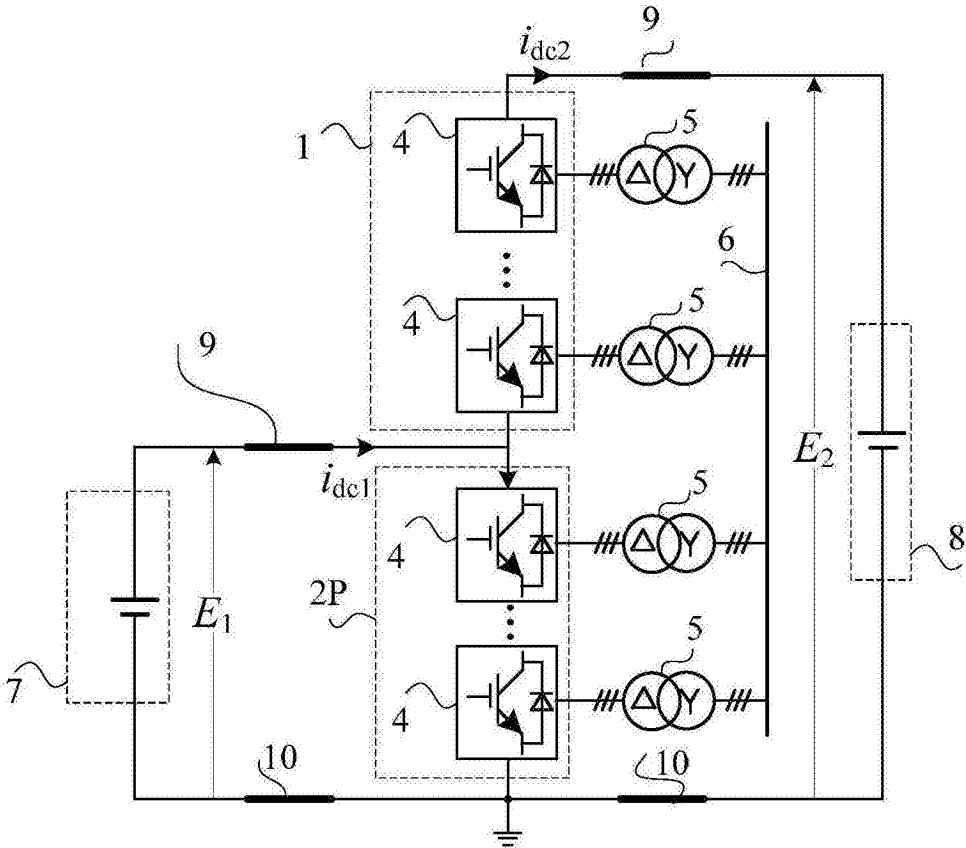


图 4

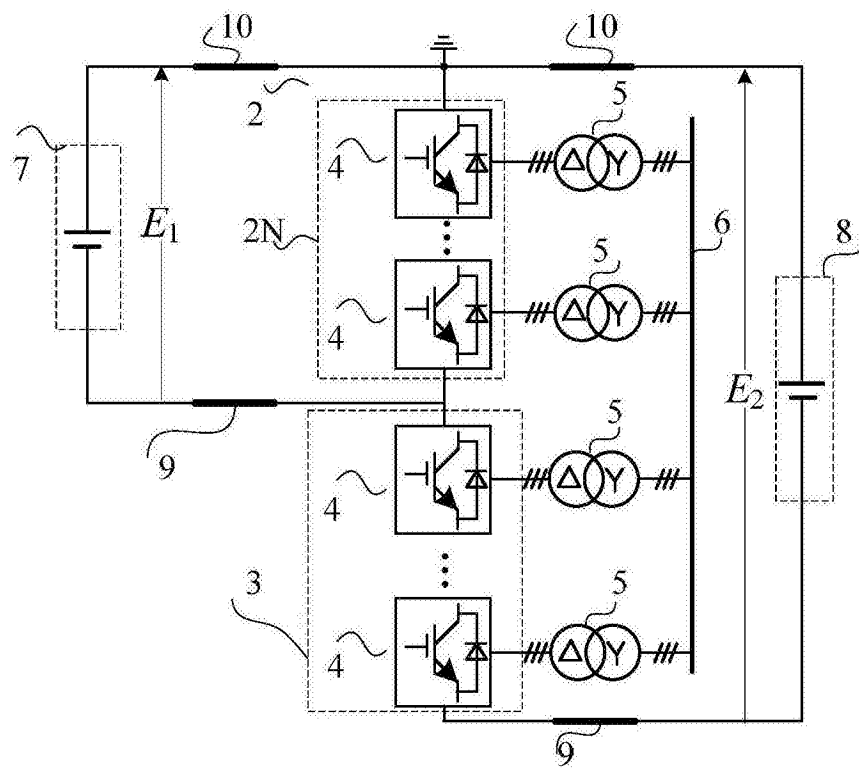


图 5

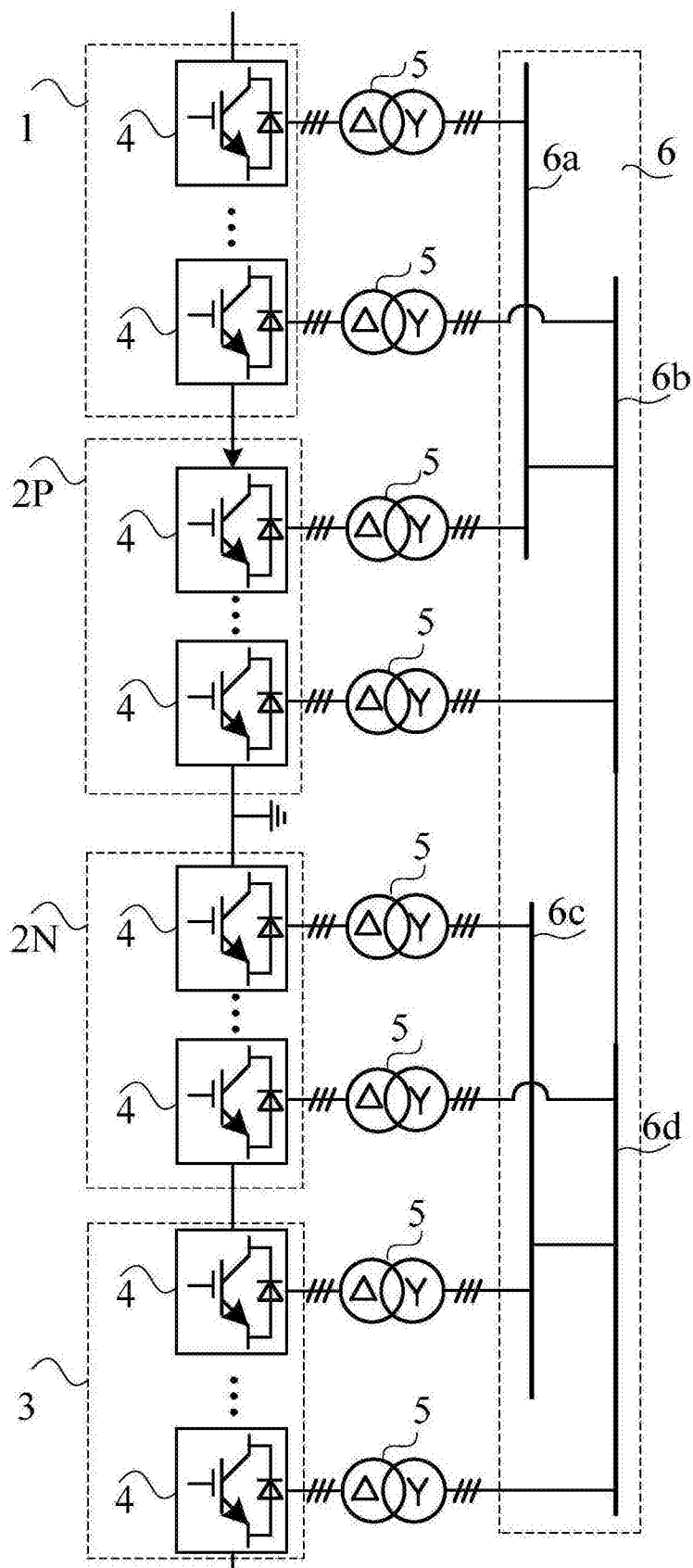


图 6

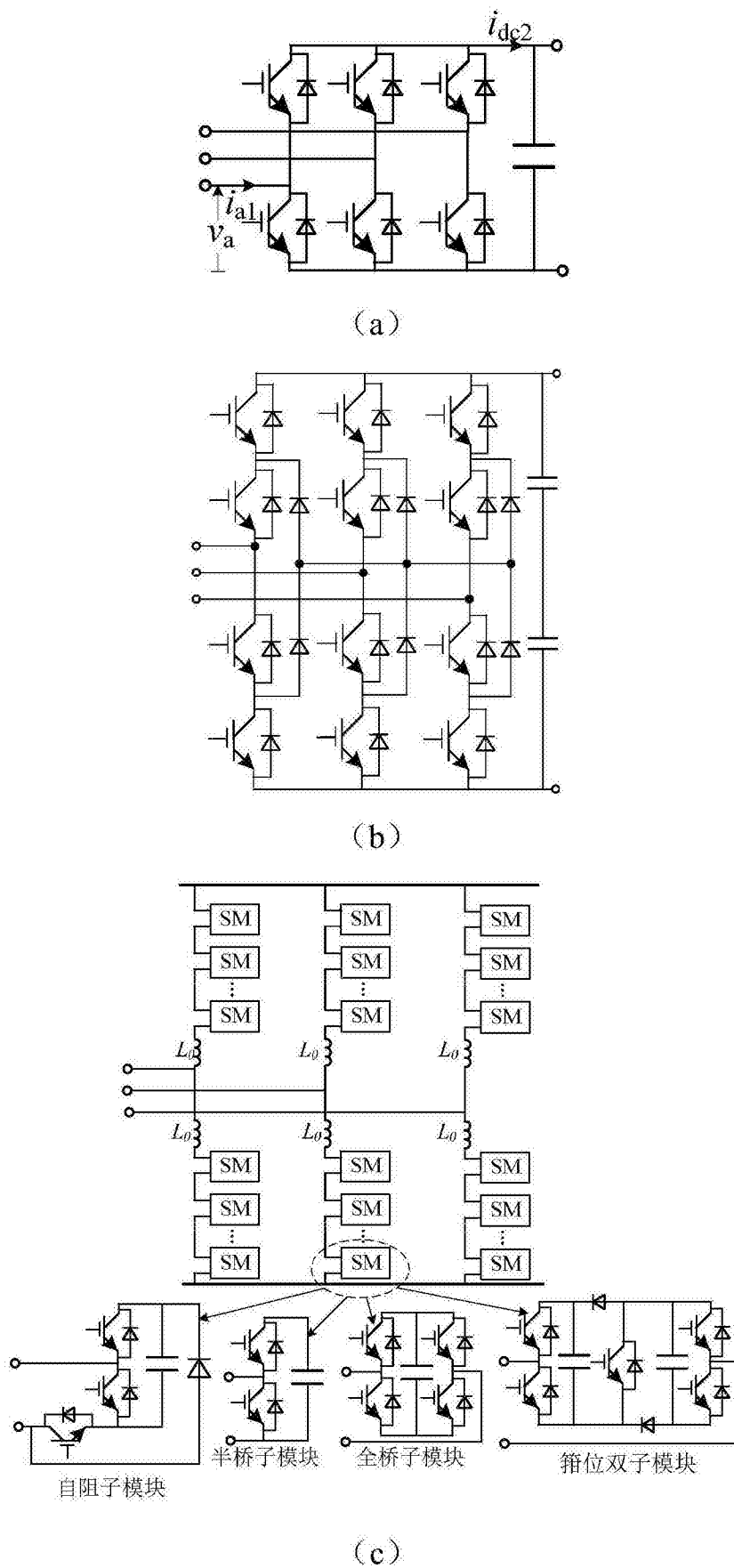


图 7

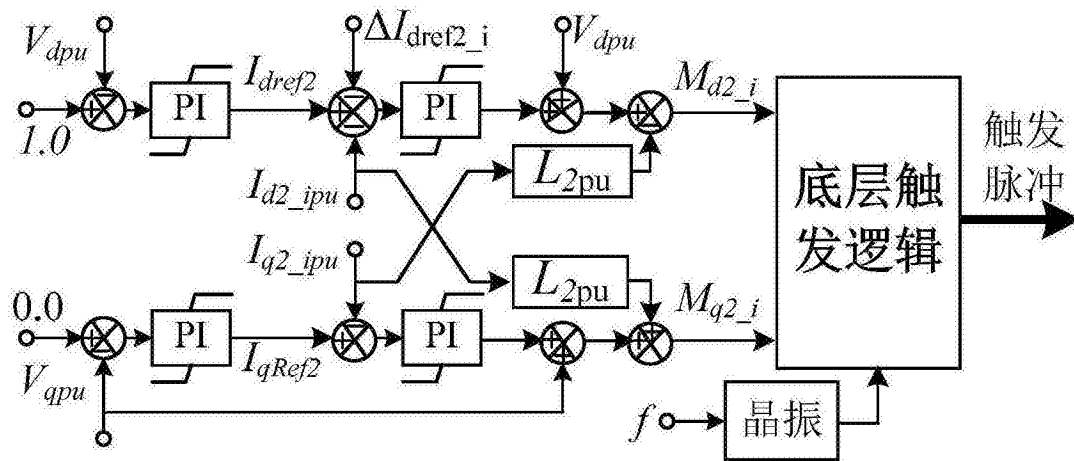


图 8

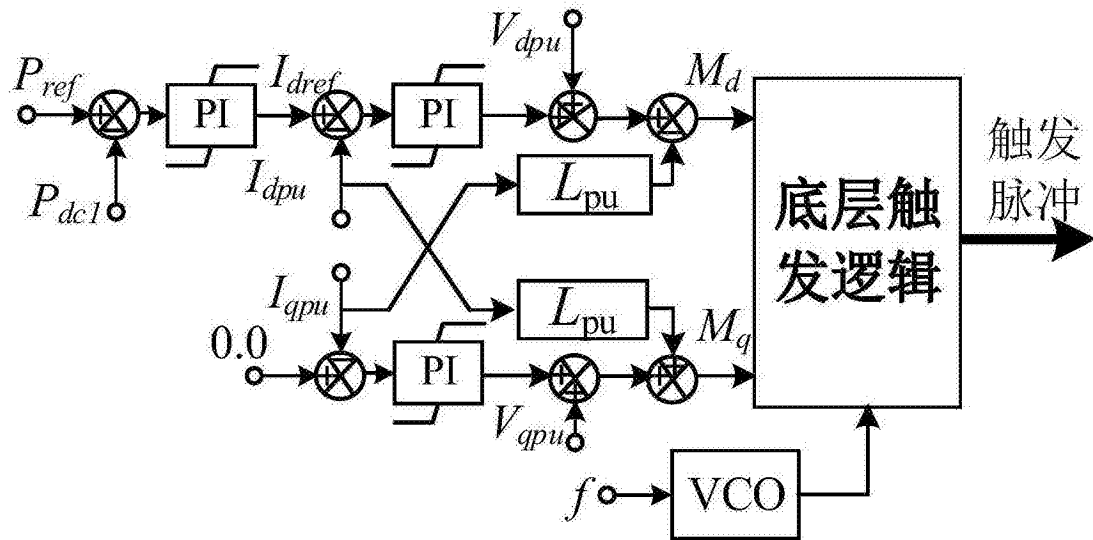


图 9

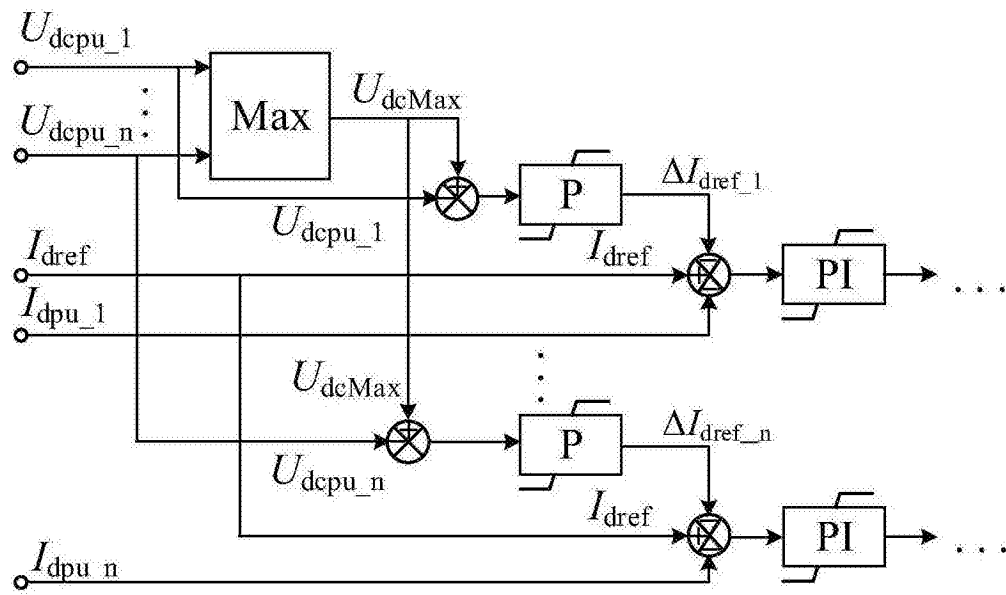


图 10

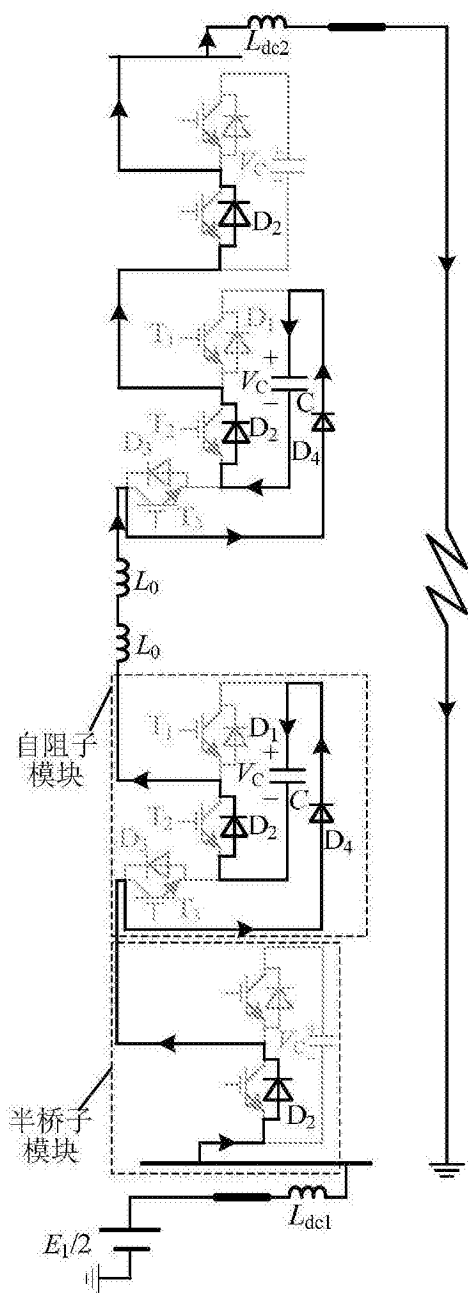


图 11

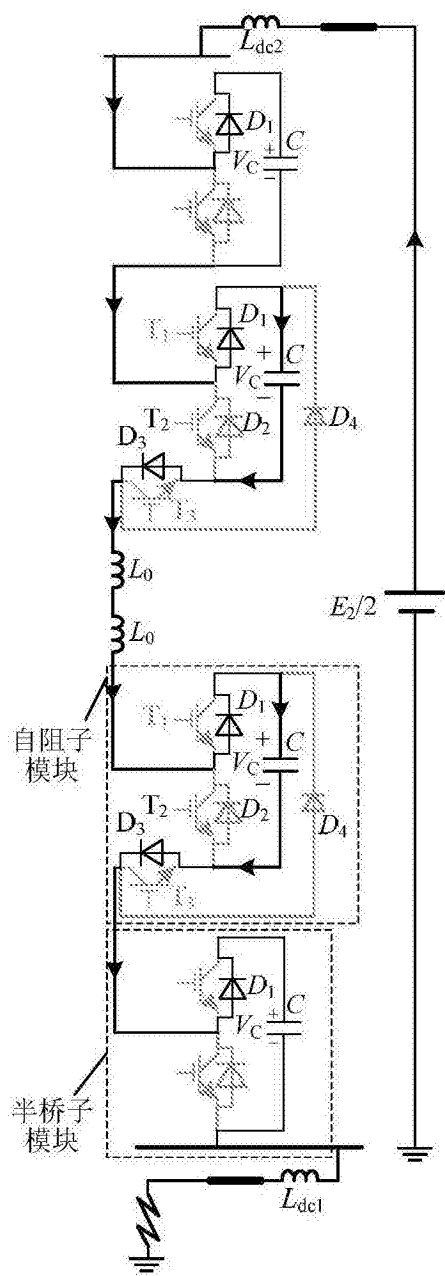


图 12

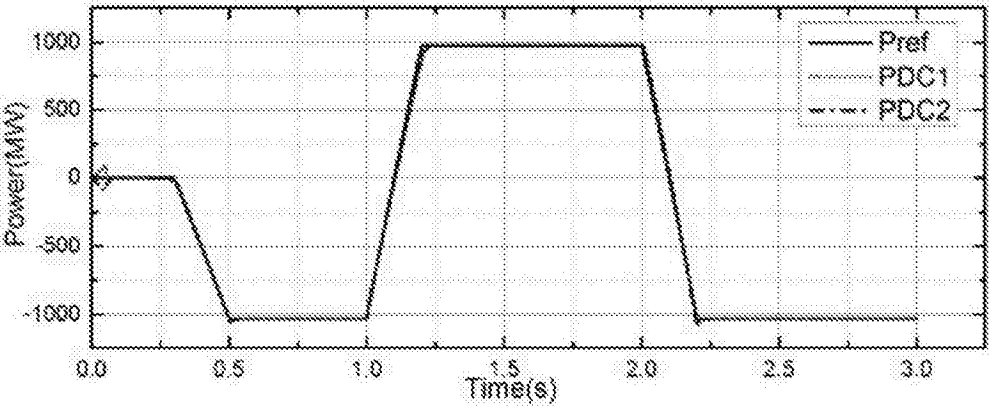


图 13

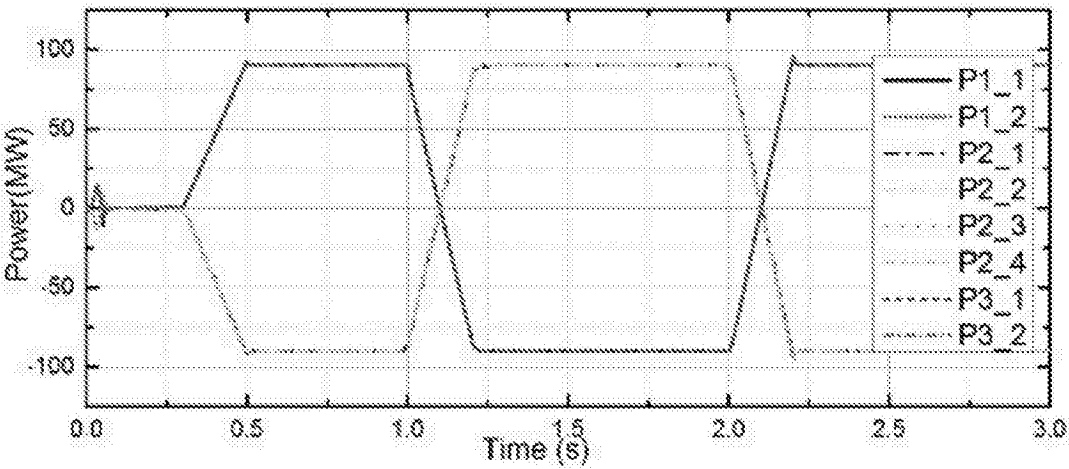


图 14

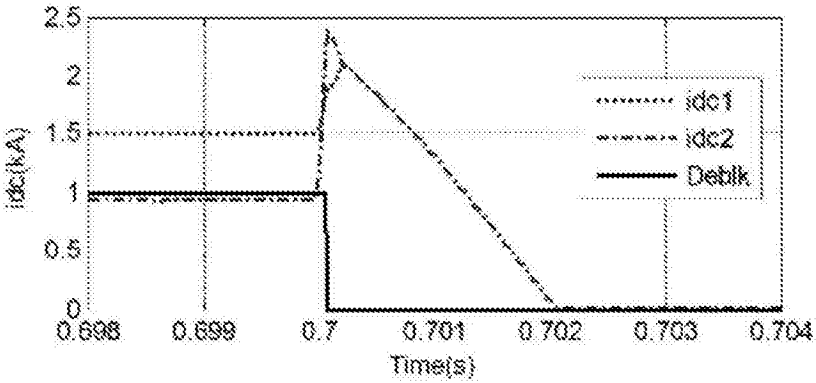


图 15

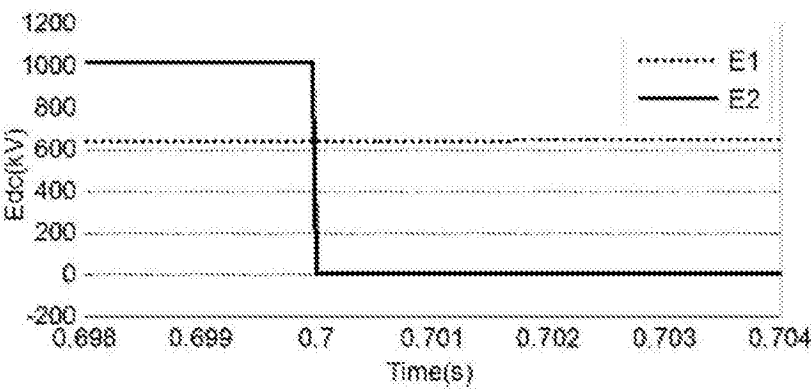


图 16

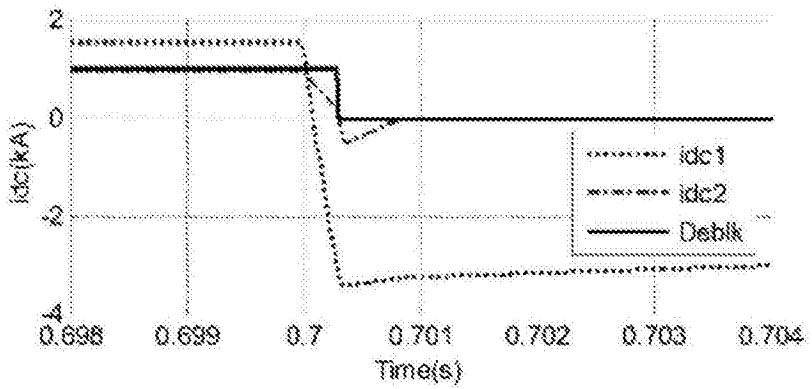


图 17

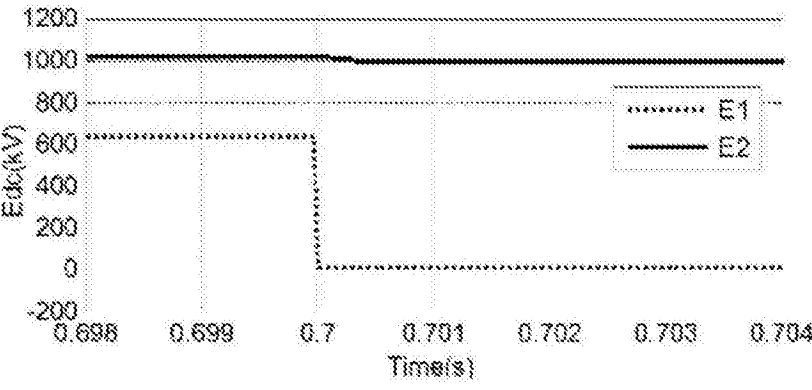


图 18