



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103368170 B

(45)授权公告日 2016.08.24

(21)申请号 201310260431.7

(22)申请日 2013.06.26

(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 姚为正 吴金龙 梁燕 韩坤
左广杰 刘普

(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 韩天宝

(51)Int.Cl.

H02J 1/00(2006.01)

H02J 3/36(2006.01)

(56)对比文件

CN 102545201 A,2012.07.04,全文.

吴俊宏等.多端柔性直流输电系统在风电场中的应用.《电网技术》.2009,第33卷(第4期),

吴俊宏等.多端柔性直流输电系统在风电场中的应用.《电网技术》.2009,第33卷(第4期),

陈海荣等.一种基于电压源型多端直流输电的供电系统.《高电压技术》.2006,第32卷(第9期),1-5.

阮思焯等.多端电压源型直流输电系统的控制策略.《电力系统自动化》.2009,第33卷(第12期),57-60.

审查员 李航

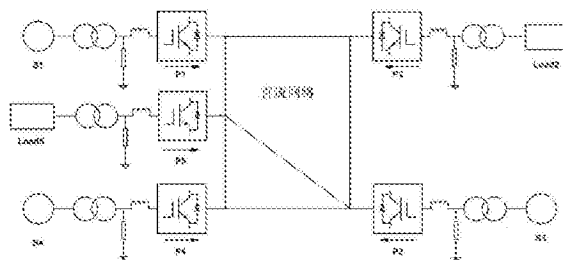
权利要求书1页 说明书5页 附图6页

(54)发明名称

一种多端柔性直流输电系统的换流器及其控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种多端柔性直流输电系统的换流器控制方法及采用本控制方法的换流器和柔性直流输电系统,当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 之间时,换流器运行于定功率控制模式;当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 以外时,换流器运行于直流母线电压控制模式,当母线电压高于设定上限值时,换流器调节直流母线电压稳定于上限值,当母线电压低于下限值时,换流器调节直流母线电压稳定于下限值。采用本方法,直流电压与潮流协调控制可以同时进行,适合应用于大规模多落点的分布式多端柔性直流系统工程。



1. 一种多端柔性直流输电系统的换流器控制方法,其特征在于,当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 之间时,换流器运行于定功率控制模式;当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 以外时,换流器运行于直流母线电压控制模式,当母线电压高于设定上限值时,换流器调节直流母线电压稳定于上限值,当母线电压低于下限值时,换流器调节直流母线电压稳定于下限值;当换流器运行于定功率控制模式,将维持有功功率按照其功率指令值 P_{order} 进行控制,此时有功潮流控制器的输出作为有功电流指令 i_{dref} 的输入;当换流器运行于直流母线电压控制模式,将切换原先通过其功率指令值 P_{order} 进行控制至通过直流母线电压值 U_{dc} 进行控制,直流电压控制器的输出作为有功电流指令 i_{dref} 的输入;设定上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 及整流和逆变权衡函数;包括三种权衡函数的配置形式,第一种为直流电压高低控制器完全优先,第二种为有功潮流优先,第三种为有功潮流限定协调方式。

2. 根据权利要求1所述的一种多端柔性直流输电系统的换流器控制方法,其特征在于,换流器采用基于旋转坐标系的直接电流控制方法,其基于旋转坐标系的外环控制包括用于产生有功电流指令 i_{dref} 的功率控制器,功率控制器包括有功潮流控制器和直流电压控制器,当换流器运行于定功率控制模式,有功潮流控制器的输出为有功电流指令 i_{dref} 的输入;当换流器运行于直流母线电压控制模式,直流电压控制器的输出为有功电流指令 i_{dref} 的输入。

3. 根据权利要求2所述的一种多端柔性直流输电系统的换流器控制方法,其特征在于,所述直流电压控制器包括电压低限控制器和电压高限控制器。

4. 一种采用权利要求1所述控制方法的换流器,其特征在于,当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 之间时,换流器运行于定功率控制模式;当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 以外时,换流器运行于直流母线电压控制模式,当母线电压高于设定上限值时,换流器调节直流母线电压稳定于上限值,当母线电压低于下限值时,换流器调节直流母线电压稳定于下限值。

5. 根据权利要求4所述的换流器,其特征在于,换流器采用基于旋转坐标系的直接电流控制方法,其基于旋转坐标系的外环控制包括用于产生有功电流指令 i_{dref} 的功率控制器,功率控制器包括有功潮流控制器和直流电压控制器,当换流器运行于定功率控制模式,有功潮流控制器的输出为有功电流指令 i_{dref} 的输入;当换流器运行于直流母线电压控制模式,直流电压控制器的输出为有功电流指令 i_{dref} 的输入。

6. 根据权利要求5所述的换流器,其特征在于,所述直流电压控制器包括电压低限控制器和电压高限控制器。

7. 一种采用权利要求1所述的控制方法的多端柔性直流输电系统,其特征在于,该直流输电系统中各换流器根据负荷重要性的不同设定不同的电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 。

一种多端柔性直流输电系统的换流器及其控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种多端柔性直流输电系统的换流器控制方法,应用该控制方法的换流器以及应用该换流器的柔性直流输电系统。

背景技术

[0002] 柔性直流输电技术以可关断电力电子器件和电压源型换流器(VSC)为基础,多为BtB拓扑结构并以地下电缆及海底电缆为传输媒介实现电能传输。其中电压源型换流器(VSC)是该输电系统的基本组成单元。目前应用于实际工程的拓扑结构有两电平、三电平及模块化多电平等拓扑结构。

[0003] 多端直流输电(MTDC)系统是指含有多个整流站或多个逆变站的直流输电系统。其显著特点在于能够实现多电源供电、多落点受电,提供一种更为灵活、快捷的输电方式。MTDC输电系统主要应用于:由多个能源基地输送电能到远方的多个负荷中心;不能使用架空线路走廊的大城市或工业中心;直流输电线路中间分支接入负荷或电源;几个孤立的交流系统之间利用直流输电线路实现电网的非同期联络等。随着大功率电力电子全控开关器件技术的进一步发展、新型控制策略的研究、直流输电成本的逐步降低以及电能质量要求的提高,基于常规的电流源换流器(Current Source Converter CSC)和电压源型换流器(Voltage Source Converter VSC)的混合MTDC输电技术、基于FACTS的MTDC输电技术、以及基于VSC的新型MTDC技术将得到快速发展,必将大大提高MTDC输电系统的运行可靠性和实用性,扩大MTDC输电系统的应用范围,为电网提供更多的新型互联模式,为大城市直流供电的多落点受电提供新思路,为其他形式的新能源接入电网提供新方法,为优质电能库的建立提供新途径。

[0004] 与传统CSC-MTDC系统不同,VSC-MTDC系统潮流反转时直流电压方向不变,直流电流方向反转,并且不需要机械操作,速度较快,可靠性较高。它是一种既具有较高的可靠性又具有灵活多变的控制方式,因此VSC-MTDC是构建并联多端直流系统的适宜方案。

[0005] VSC-MTDC系统在运行灵活性、可靠性等方面比两端系统更具技术优势,但其运行控制相对也要复杂。与电流控制是电流源型直流输电(CSC-HVDC)系统中的基本控制方式一样,直流电压控制是VSC-HVDC系统中的基本控制。在VSC-MTDC系统中,采样直流电压控制的换流站相当于一个有功平衡结点,起功率平衡和稳定直流电压的作用,其控制性能和可靠性也就决定了整个系统的运行特性和可靠性。

[0006] VSC-MTDC直流电压与潮流协调控制策略有以下几种:(1)主从式电压控制法,特点是控制简单,可控性最强,但是需要高速通讯对系统指令进行协调;(2)电压下降法,优点是不需要上层控制器进行调整值协调,对相互通讯的要求低,具有一定的可扩展性,缺点是斜率配置复杂,潮流控制受系统主接线和直流电缆参数影响,最大缺陷是不能精确进行有功潮流控制;(3)基于电压偏差的直流电压协调控制方法,该方法的特点是无通讯独立调节,配置灵活、可扩展性强,但是在兼具直流电压协调和潮流优化控制方面,受本身控制结构的限制,其控制性能有限,其中二阶电压偏差法在进行电压偏差控制时自动切断潮流控制,因

此电压协调和潮流控制不能同时进行,而三阶电压偏差法也存在这个问题,同时每个阶段的控制能力有限。

发明内容

[0007] 本发明的目的是提供一种多端柔性直流输电系统的换流器控制方法,应用该控制方法的换流器以及应用该换流器的柔性直流输电系统,用以解决现有VSC-MTDC系统中直流电压与潮流协调控制不能同时进行的的问题。

[0008] 为实现上述目的,本发明的方案包括:一种多端柔性直流输电系统的换流器控制方法,应用该控制方法的换流器以及应用该换流器的柔性直流输电系统。

[0009] 一种多端柔性直流输电系统的换流器控制方法:当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $u_{dc_ref_high}$ 及下限值 $u_{dc_ref_low}$ 之间时,换流器运行于定功率控制模式;当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $u_{dc_ref_high}$ 及下限值 $u_{dc_ref_low}$ 以外时,换流器运行于直流母线电压控制模式,当母线电压高于设定上限值时,换流器调节直流母线电压稳定于上限值,当母线电压低于下限值时,换流器调节直流母线电压稳定于下限值。

[0010] 该控制方法中的换流器采用基于旋转坐标系的直接电流控制方法,其基于旋转坐标系的外环控制包括用于产生有功电流指令 i_{dref} 的功率控制器,功率控制器包括有功潮流控制器和直流电压控制器,当换流器运行于定功率控制模式,有功潮流控制器的输出为有功电流指令 i_{dref} 的输入;当换流器运行于直流母线电压控制模式,直流电压控制器的输出为有功电流指令 i_{dref} 的输入。

[0011] 该控制方法中直流电压控制器包括电压低限控制器和电压高限控制器。

[0012] 采用该控制方法的换流器:当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $u_{dc_ref_high}$ 及下限值 $u_{dc_ref_low}$ 之间时,换流器运行于定功率控制模式;当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $u_{dc_ref_high}$ 及下限值 $u_{dc_ref_low}$ 以外时,换流器运行于直流母线电压控制模式,当母线电压高于设定上限值时,换流器调节直流母线电压稳定于上限值,当母线电压低于下限值时,换流器调节直流母线电压稳定于下限值。

[0013] 该换流器采用基于旋转坐标系的直接电流控制方法,其基于旋转坐标系的外环控制包括用于产生有功电流指令 i_{dref} 的功率控制器,功率控制器包括有功潮流控制器和直流电压控制器,当换流器运行于定功率控制模式,有功潮流控制器的输出为有功电流指令 i_{dref} 的输入;当换流器运行于直流母线电压控制模式,直流电压控制器的输出为有功电流指令 i_{dref} 的输入。

[0014] 该换流器的直流电压控制器包括电压低限控制器和电压高限控制器。

[0015] 采用该控制方法的多端柔性直流输电系统:该直流输电系统中各换流器根据负荷重要性的不同设定不同的电压上限值 $u_{dc_ref_high}$ 及下限值 $u_{dc_ref_low}$ 。

[0016] 本发明的有益效果是:采用该控制方法和该换流器的直流输电系统,换流器能够根据直流系统的运行状态自动切换自身的运行模式:在一端或者多端直流母线电压发生偏移时将切换运行模式由定功率控制模式至直流电压控制模式,将直流母线电压稳定在设定的上下限范围内,预防事故扩大;根据负荷重要性的不同设定不同的电压上下限可以在直流系统发生故障时优先确保关键负荷的供电。采用本方法的多端系统直流工作点固定,控制结构简单,系统配置灵活,可扩展性强,适合应用于大规模多落点的分布式多端柔性直流

系统工程。

附图说明

- [0017] 图1是多端柔性直流输电的结构简图；
- [0018] 图2a是模块化多电平柔性直流输电换流器等值电路；
- [0019] 图2b是模块化多电平柔性直流输电换流器控制框图；
- [0020] 图3a是具有直流母线电压高低压限控制功能的功率控制器控制框图；
- [0021] 图3b是具有直流母线电压高低压限控制功能的功率控制器外部控制特性图；
- [0022] 图4是模块化多电平直流输电换流器仿真系统结构图；
- [0023] 图5a是模块化多电平柔性直流输电换流器多端系统交流电压零电压跌落仿真试验交流电压波形；
- [0024] 图5b是模块化多电平柔性直流输电换流器多端系统交流电压零电压跌落仿真试验直流母线电压波形；
- [0025] 图5c是模块化多电平柔性直流输电换流器多端系统交流电压零电压跌落仿真试验直流电流波形；
- [0026] 图6a是模块化多电平柔性直流输电换流器多端系统功率运行仿真试验直流电压波形；
- [0027] 图6b是模块化多电平柔性直流输电换流器多端系统功率运行仿真试验直流电流波形。

具体实施方式

- [0028] 下面结合附图对本发明做进一步详细的说明。
- [0029] 多端柔性直流输电系统的结构简图如图1所示：以功率从交流侧向直流侧流动为正方向，S1、S3、S4为供电电源，Load2、Load5为用电负荷。图2a为柔性直流输电系统换流器的等值电路，其中 P_s 、 Q_s 为交流侧有功及无功功率， I_{a1} 、 I_{b1} 、 I_{c1} 、 U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} 分别为交流侧三相的电流与电压， U_{ca} 、 U_{cb} 、 U_{cc} 为经过换流器阻抗消耗后的交流电压， P_c 、 I_{dc} 为该换流器输入直流电网的功率与电流，以从交流侧向直流侧流动为正方向， U_{dc} 为换流器直流侧端电压，具体工作方式在此不再赘述。图2b是柔性直流输电换流器控制框图，此控制框图所涉及的定功率控制方式，直流电压控制(定电压控制)方式本身原理、措施及图中标号等均属于现有技术，在此不再赘述，具体内容参照论文《基于dq0同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究》(电力系统保护与检测,37卷22期)。增加各符号标注说明。
- [0030] 多端柔性直流输电的换流器具体控制方法如下：
- [0031] 设定换流器的上限值 $U_{dc_ref_high}$ 与下限值 $U_{dc_ref_low}$ 及整流和逆变权衡函数。在正常运行时，母线电压处于设定电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 与下限值 $U_{dc_ref_low}$ 范围内，经过权衡函数的运算后控制换流器运行于定功率控制模式；当直流母线电压处于预先设定的电压上限值 $U_{dc_ref_high}$ 及下限值 $U_{dc_ref_low}$ 以外时，经过权衡函数的运算后切换换流器运行于直流母线电压控制模式，当母线电压超过上限值时，控制母线电压稳定于上限值，当母线电压低于下限值时，控制母线电压稳定于下限值。当换流器运行于定功率控制模式，将维持有功功率按照其功率指令值 P_{order} 进行控制，此时有功潮流控制器的输出作为图2b中有功电流指令 i_{dref} 的

输入;当换流器运行于直流母线电压控制模式,将切换原先通过其功率指令值 P_{order} 进行控制至通过直流母线电压值 U_{dc} 进行控制,直流电压控制器的输出作为图2b中有功电流指令 i_{dref} 的输入,通过这种方式,换流器能够平稳的在两种工作模式中相互切换,解决了原先一个换流器不能既工作在定功率控制模式又工作在稳定直流母线电压模式的问题。完成模式切换操作的功率控制器控制框图如图3a所示,图3a是基于电压偏差原理提出的协调控制器结构,功率控制器包括直流电压控制部分和有关潮流控制部分。其中电压高低限控制器均为PI控制器,用于直流电压超过偏差范围时进行有功的调节从而控制直流电压,有功潮流控制器是基于稳态逆模型的PI控制器,该控制器用于直流电压在高低限范围之内时进行快速的潮流闭环控制;由于三个控制器输出均通过加法器相加作为有功电流指令,从而为电压控制器和潮流控制器的竞争创造了条件,而权衡函数就是基于直流电压高低限控制器输出结果来调整潮流控制器的输出,进而按照预先配置的参数进行直流电压和有功潮流的协调控制,该权衡函数可以根据系统的直流电压和有功潮流的协调需求进行不同配置,最简单的配置为一个常数,该常数和电压控制器输出相结合,并于潮流控制器进行比较分析,结合当前换流器的实际直流母线电压有输出有功情况,基于直流电压稳定和潮流优化分配原则最终决定输出的有功电流指令。该协调控制器的输入共有5个变量,分别为电压高限指令 $U_{dc_ref_High}$ 、电压低限指令 $U_{dc_ref_Low}$ 、有功功率指令 P_{ref} 、直流母线电压 U_{dc} 和换流器交流侧实际有功功率 P ,输出为换流器的有功电流指令 I_{d_ref} ;其中电压高低限控制器和有功潮流控制器的PI参数由系统传递函数基于动态特性进行配置;电压低限控制器的输出限幅为该端换流器参与协调控制的整流有功限制,其中低限 $P_{vdc_Low_lower}$ 设置为零,高限 $P_{vdc_Low_upper}$ 的配置直接决定了该端参与电压协调控制的整流有功能力,实际结合工程需求进行配置;电压高限控制器的输出限幅为该端换流器参与协调控制的逆变有功限制,其中高限 $P_{vdc_High_upper}$ 设置为零,低限 $P_{vdc_High_lower}$ 的配置直接决定了该端参与电压协调控制的逆变有功能力,实际结合工程需求进行配置;权衡函数的配置有多种形式,但总体有三种方案:第一种方案为直流电压高低限控制器完全优先,此时当直流电压超过高限限值时,有功潮流将会进行改变以满足直流电压最大稳定性,实际有功潮流和指令不再相等;该方案适合于具有很强的紧急潮流支撑的交流电网端;第二种方案为有功潮流优先,此时该端换流器在直流电压超过高低限初期进行一定程度的直流电压控制,但由于权衡函数配置为有功潮流优先,在进行稳态时,有功潮流仍然保证为闭环指令值,该方案能在动态初期进行直流电压控制,稳定后仍然保证潮流输送,该方案适合于具有一定的暂态紧急潮流支撑的交流电网端;第三种方案为有功潮流限定协调方式,此时直流电压超过高低限时,潮流也将改变进行一定程度的直流电压支撑,但也会考虑该端潮流的输送需求,该种方式下由于协调作用导致的交流潮流改变量介于一、二两种方案之间,该方案适合于换流器必须保证一定程度潮流输送的交流电网端;而最后的是保证该端换流器在允许的容量下运行,其中 I_{d_upper} 为该端换流器最大整流有功电流限定值, I_{d_lower} 为该端换流器最大逆变有功电流限定值,有功电流限幅值一般设定为变流器允许的最大连续运行负荷电流。

[0032] 具有直流母线电压高低压限控制功能的有功功率控制器的外特性符合如图3b的要求:

[0033] 在控制过程中,母线电压超出设定好的上下限值时,功率控制器工作在直流电压

控制模式,此时电压恒定为对应的设定好的上下限值;当母线电压在上下限值范围内时,切换为定功率控制模式,此时功率恒定。

[0034] 选定各端的直流母线电压高低压限值,各端限值可以一致,也可以选为不同值,该限值选择的不同将引起潮流分配优先权不同。下面的仿真实例中,对不同的换流器对应负荷设定不同的优先级——即不同的上下限值。

[0035] 下面通过仿真验证直流电压高低压限控制方法的有效性。

[0036] 根据以上的控制策略,在MATLAB/SIMULINK软件中搭建了模块化多电平柔性直流输电换流器多端系统的仿真模型。该模型由五个换流器直流侧共点接入系统,接线简图如图4所示。其中1#换流器额定功率为350MW,2#换流器的额定功率为100MW,3#换流器的额定功率为100MW,4#换流器的额定功率为200MW,5#换流器的额定功率为100MW,直流母线额定电压为400kV。1#换流器为定直流母线电压运行模式,2—5#换流器均为定功率运行模式。2#、3#、4#、5#均为具有直流母线电压高低压限控制功能的功率控制器,其中4#低压限为370kV、其余低压限为380kV。

[0037] 仿真一:1#换流器为定直流母线电压模式,母线电压指令为400kV;2#换流器从直流侧抽功率50MW,3#换流器从直流侧抽功率100MW,4#换流器从直流侧抽功率100MW,5#换流器从直流侧抽功率100MW。0.6S时1#换流器电网侧发生三相零电压跌落故障。图5a为1#换流器交流电压波形,图5b为直流母线电压波形,图5c为1—5#换流器直流母线电流波形(以换流器交流侧流向直流侧为正方向)。从仿真波形中可看出0.6S故障后1#换流器退出运行,其直流电流降为0A,2#、3#、5#换流器由之前的定功率模式切入至直流母线电压控制状态,并将母线电压稳定在下限值380kV,4#换流器仍保持100MW功率运行。

[0038] 仿真二:1#换流器为定直流母线电压模式,母线电压指令为400kV;0.2S2#开始从直流侧抽功率100MW,3#换流器从直流侧抽功率50MW,5#从直流侧抽功率100MW,0.5S时4#开始从直流侧抽功率150MW,0.7S时4#转为向直流侧送功率100MW;1.0S2#向直流送功率70MW,3#向直流送功率70MW,5#开始向直流送功率70MW,1.3S4#向直流送功率200MW,1.7S4#转为从直流侧抽功率20MW。图6a、6b为本试验的仿真波形。从波形中可以看出0.5S时由于1#功率传输有限,2—5#4个换流器抽的功率总和超出了1#换流器的输送能力,此时1#换流站转为整流方向最大功率输出运行,直流母线电压跌落,2#、3#、5#在0.5S切入至直流母线电压控制,将母线电压稳定在其下限值380kV,当0.7S时2—5#从直流侧抽功率的总和转为50MW,此时1#换流器功率可以满足其余四个换流器的运行要求,1#换流器再次将母线电压控制在400kV,2#、3#、5#转为原先的定功率控制,其传输功率恢复至功率指令值。1.0S2#、3#、5#转为向直流侧输出功率,此时4#也向直流侧输出功率,4个换流器向直流侧输出功率总和为310MW,系统正常运行,在1.3S时,4#向直流侧输出功率增大至200MW增大了100MW,此时4个换流器向直流侧输送总功率为410MW,超出了1#换流器的传输能力,此时1#换流器转为逆变方向最大功率输出运行,直流母线电压升高,2#、3#、5#1.3S切入至直流母线电压控制,将母线电压稳定在其上限值400kV,当1.7S时2—5#向直流侧送功率的总和转为190MW,此时1#换流器功率可以满足其余四个换流器的运行要求,1#换流器再次将母线电压控制在400kV,2#、3#、5#转为原先的定功率控制,其传输功率恢复至功率指令值。

[0039] 以上仿真验证了本控制方法的有效性。

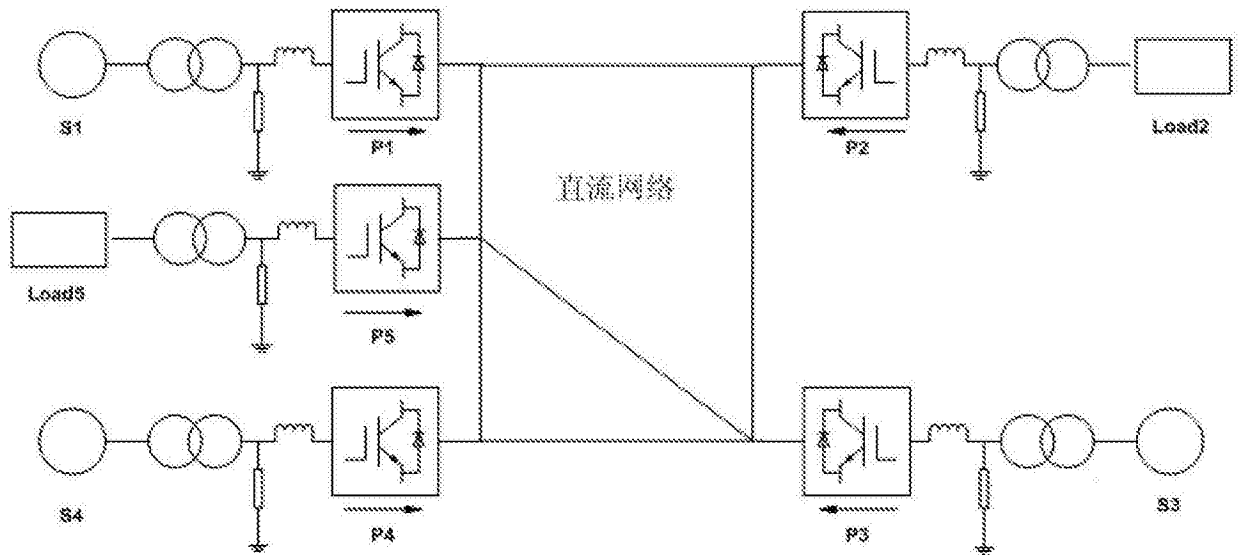


图1

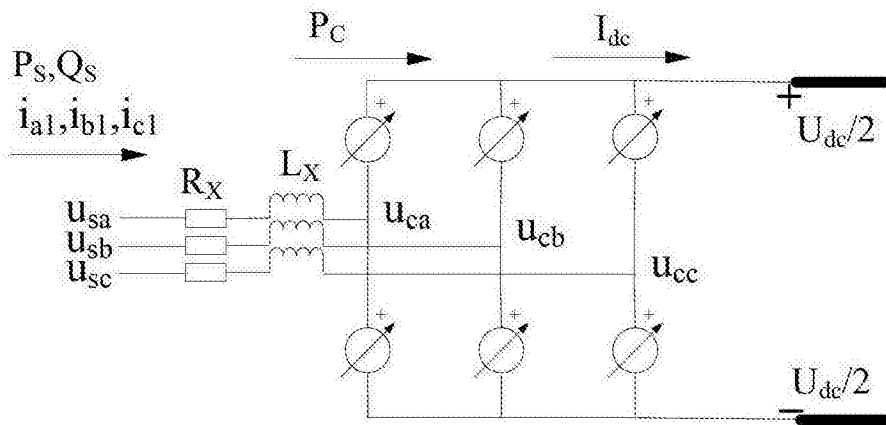


图2a

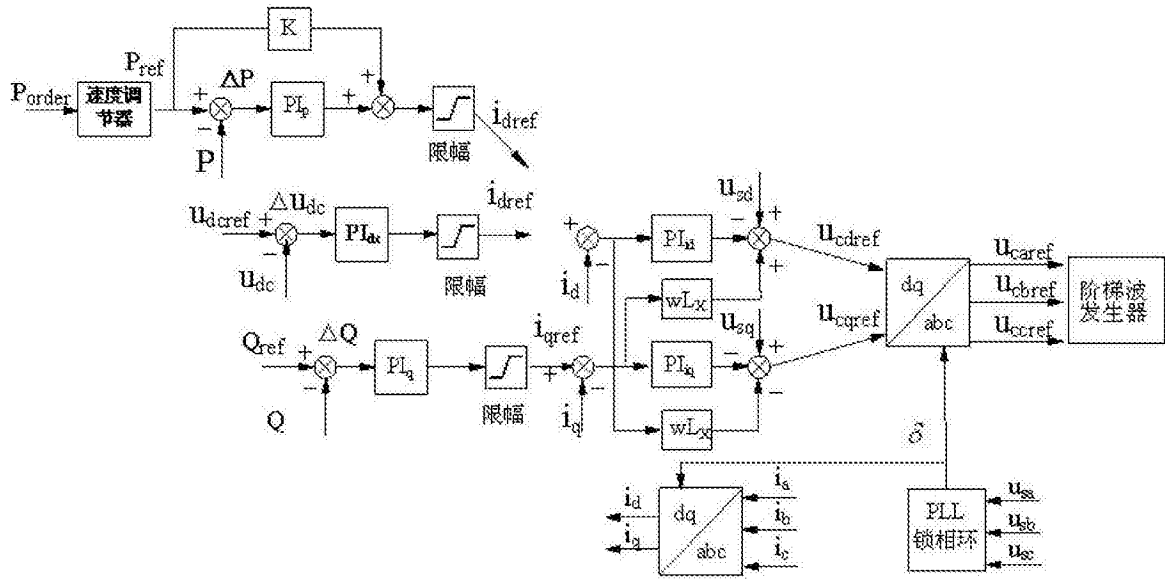


图2b

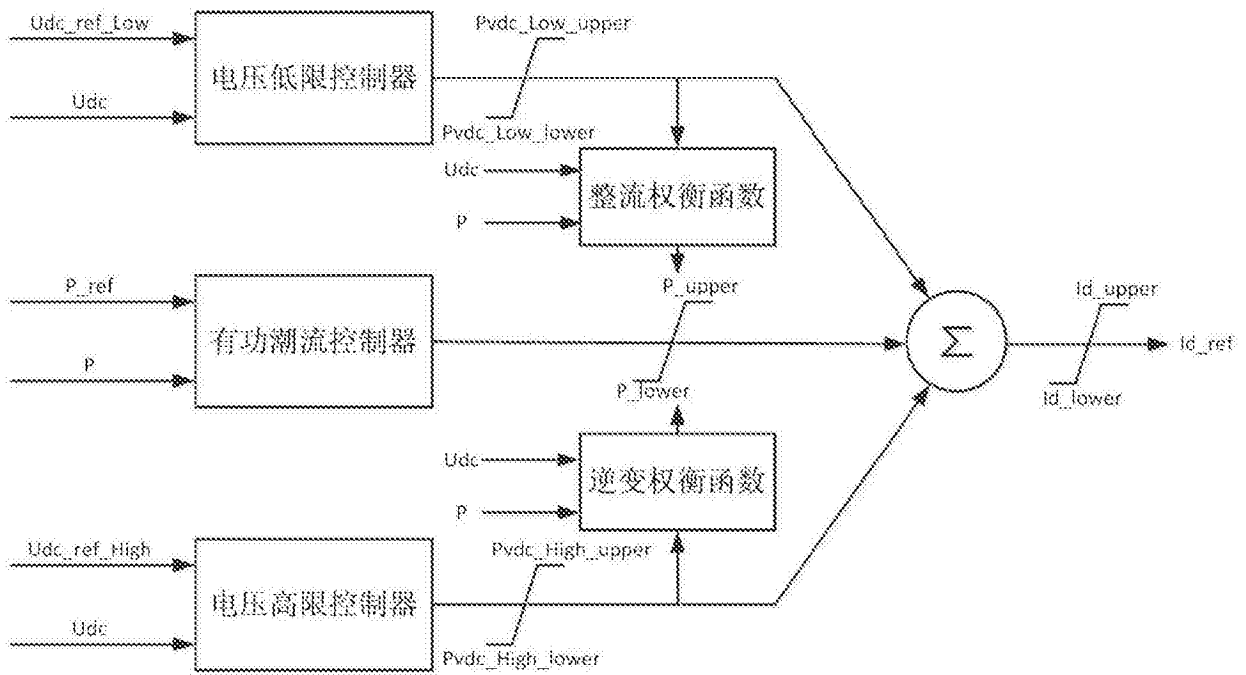


图3a

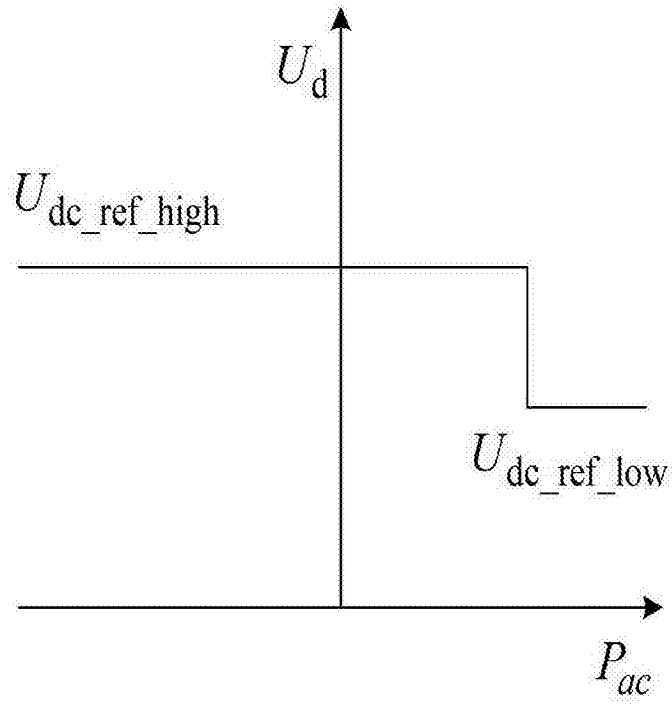


图3b

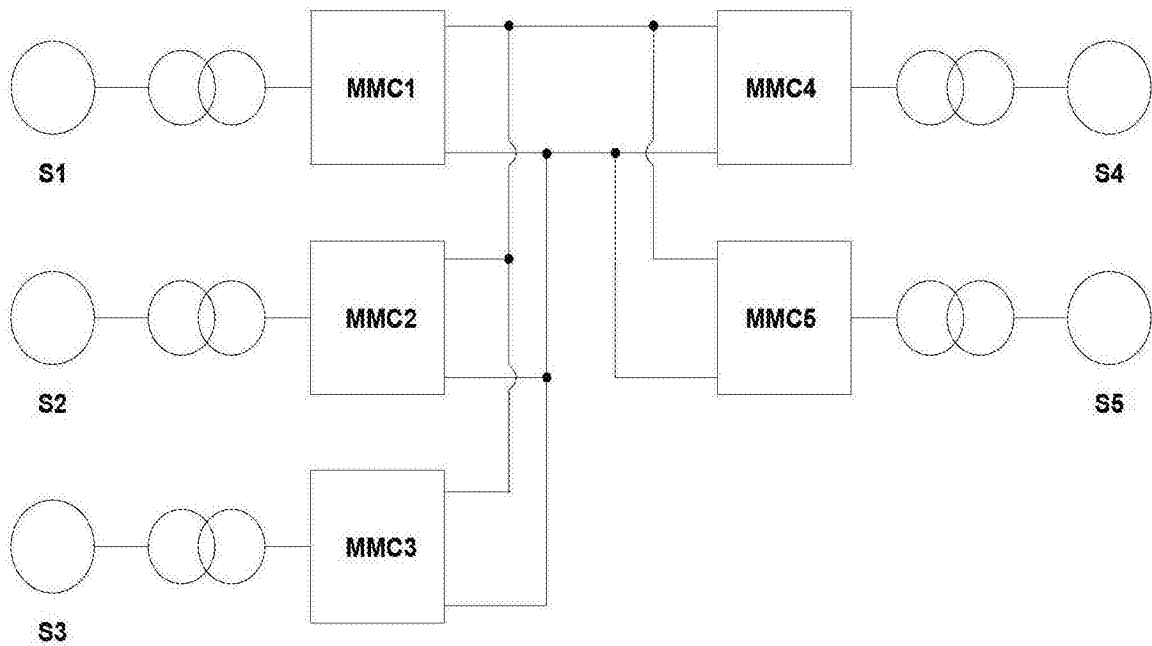


图4

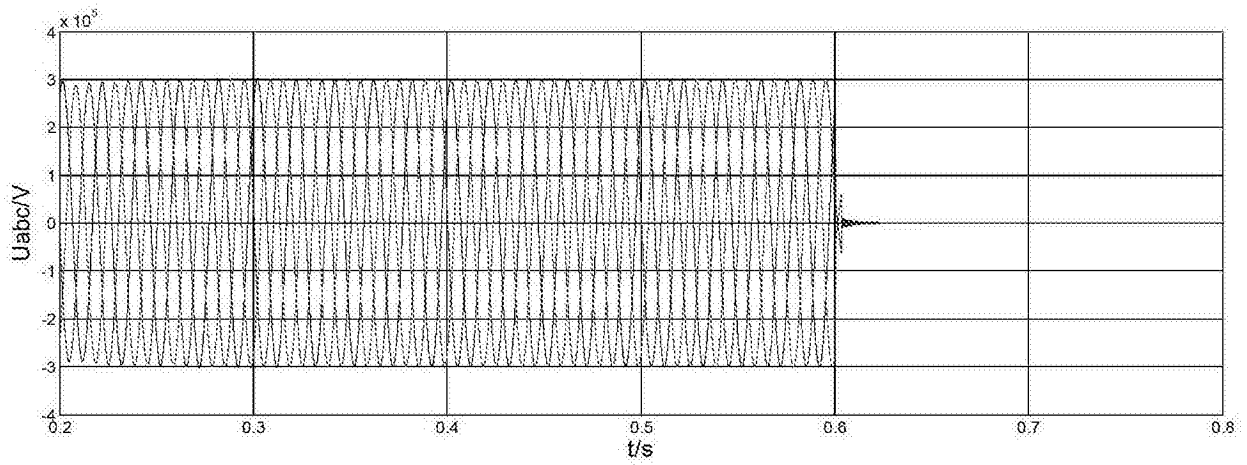


图5a

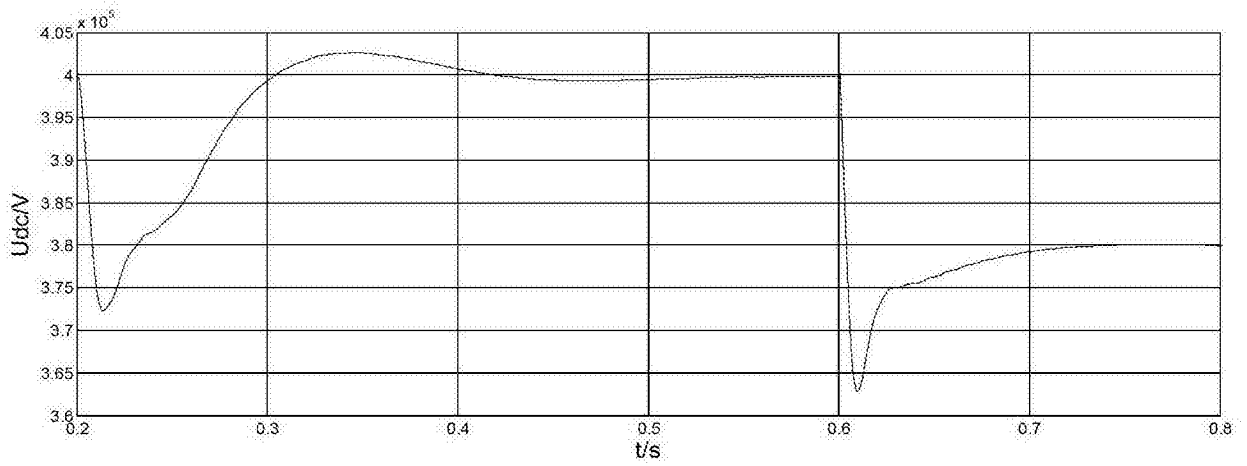


图5b

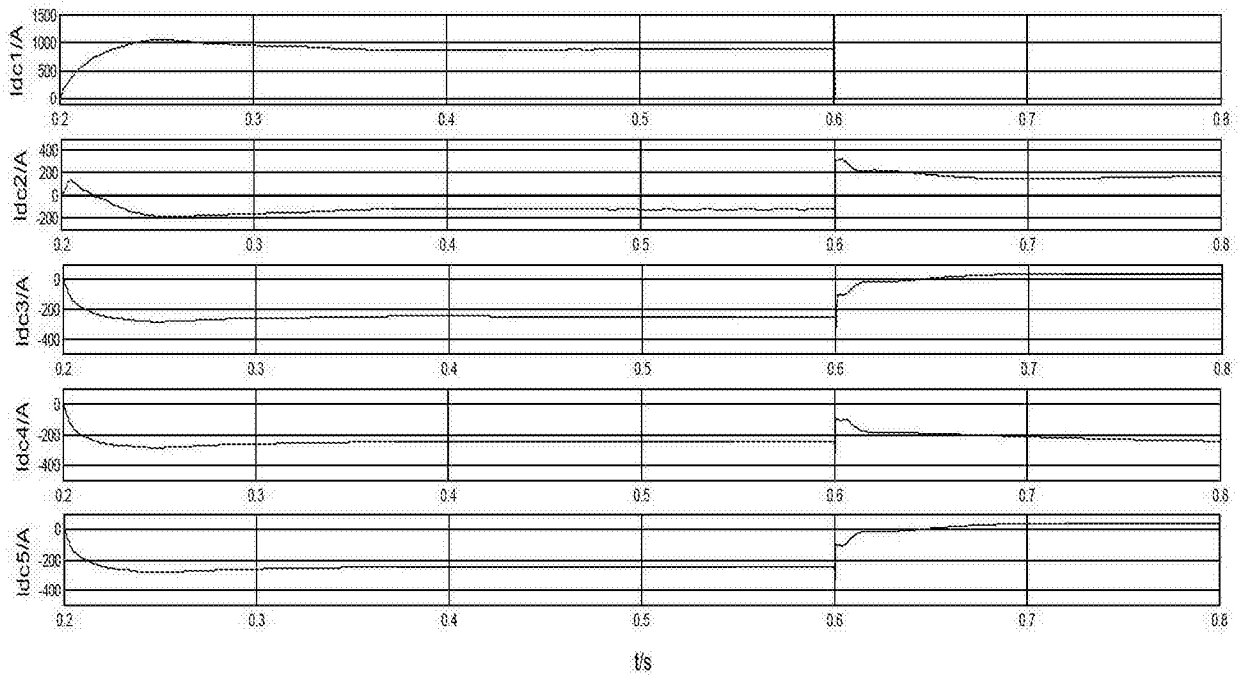


图5c

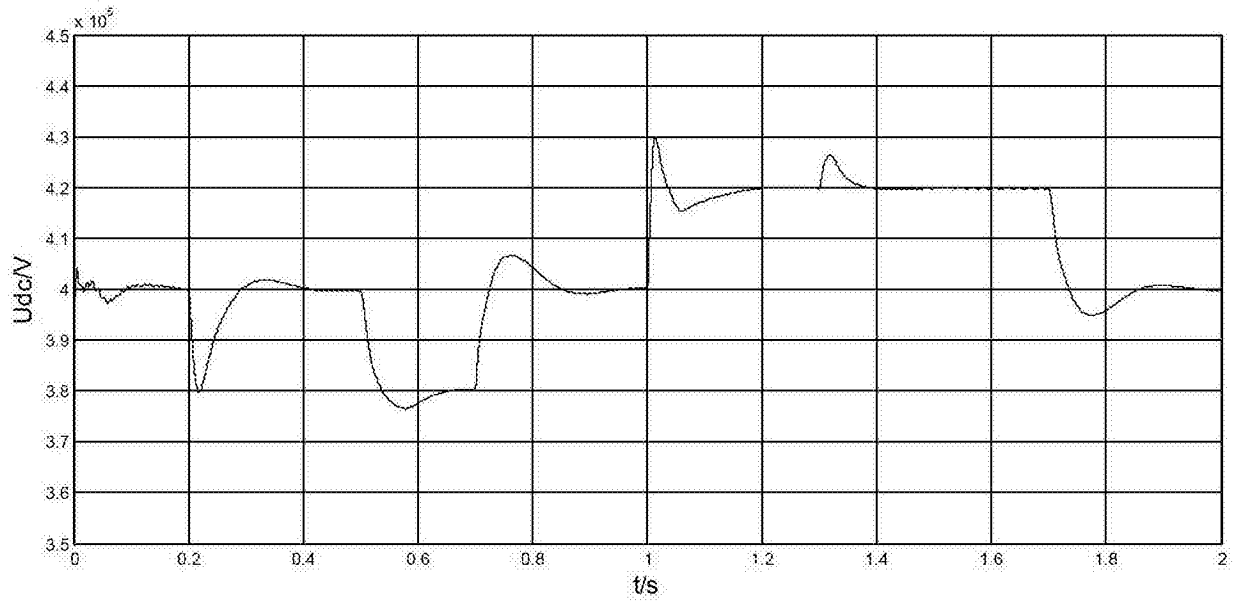


图6a

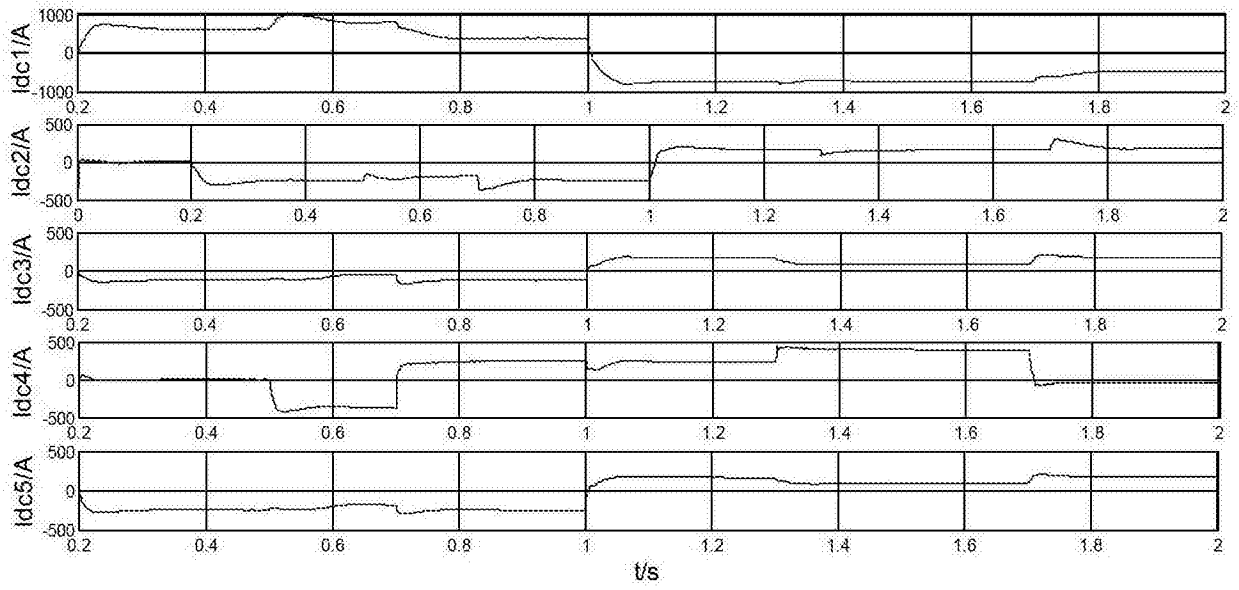


图6b