



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105244902 A

(43) 申请公布日 2016. 01. 13

(21) 申请号 201510703215. 4

(22) 申请日 2015. 10. 23

(71) 申请人 南方电网科学研究院有限责任公司
地址 510080 广东省广州市越秀区东风东路
水均岗 8 号

申请人 中国南方电网有限责任公司

(72) 发明人 魏承志 张祥 文安 赵曼勇
李岩 傅闯 袁智勇 黄维芳
牟敏 金鑫 叶皖

(74) 专利代理机构 广州华进联合专利商标代理
有限公司 44224

代理人 王程

(51) Int. Cl.

H02J 3/36(2006. 01)

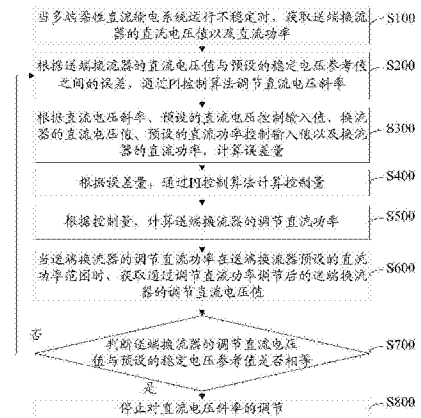
权利要求书3页 说明书13页 附图8页

(54) 发明名称

多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制
方法及系统

(57) 摘要

本发明涉及一种多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法及系统, 根据直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差, 通过 PI 控制算法调节直流电压斜率, 根据直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、直流电压值之间、预设的直流功率控制输入值以及直流功率, 计算误差量, 根据误差量, 通过 PI 控制算法计算控制量, 根据控制量, 调节送端换流器的直流功率, 以使送端换流器的直流电压值靠近预设的稳定电压参考值。通过对直流电压斜率在多端柔性直流输电系统发生扰动时能够随着多端柔性直流输电系统的直流电压的偏差自适应地调节, 不但能调节换流器的直流功率使直流输电系统内功率平衡, 而且能实现电压的恒定控制。



1. 一种多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法,所述多端柔性直流输电系统包括至少两个换流器,至少一个换流器作为送端,至少一个换流器作为受端,送端换流器与受端换流器通过直流输电线路连接,其特征在于,包括以下步骤:

当所述多端柔性直流输电系统运行不稳定时,获取所述送端换流器的直流电压值以及直流功率;

根据所述送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率;

根据所述直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、所述送端换流器的直流电压值、预设的直流功率控制输入值以及所述送端换流器的直流功率,计算误差量;

根据所述误差量,通过 PI 控制算法计算控制量;

根据所述控制量,计算所述送端换流器的调节直流功率;

当所述调节直流功率在所述送端换流器预设的直流功率范围时,获取通过所述调节直流功率调节后的所述送端换流器的调节直流电压值;

判断所述送端换流器的所述调节直流电压值与所述预设的稳定电压参考值是否相等;

若相等,则停止对所述直流电压斜率的调节;

若不相等,则返回所述根据所述送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率的步骤。

2. 根据权利要求 1 所述的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法,其特征在于,所述直流电压斜率的控制参数包括第一比例系数和第二比例系数,所述直流电压斜率为所述第一比例系数与第二比例系数的比值的相反数;

计算所述误差量的公式具体为:

$$e_{rr} = k_p(P_0 - P_d) + k_u(U_0 - U_{ref});$$

式中,所述 e_{rr} 为所述误差量,所述 k_p 为所述第一比例系数,所述 k_u 为所述第二比例系数,所述 P_0 为所述预设的直流功率控制输入值,所述 P_d 为所述直流功率,所述 U_0 为所述预设的直流电压控制输入值,所述 U_{ref} 为所述预设的稳定电压参考值。

3. 根据权利要求 1 所述的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法,其特征在于,所述根据所述控制量,计算所述送端换流器的调节直流功率之后还包括步骤:

当所述送端换流器的所述调节直流功率超出所述预设的直流功率范围的上限时,将所述调节直流功率更新为所述预设的直流功率范围的上限;

当所述送端换流器的调节直流功率超出所述预设的直流功率范围的下限时,将所述调节直流功率更新为所述预设的直流功率范围的下限。

4. 根据权利要求 1 所述的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法,其特征在于,所述直流电压斜率的控制参数包括第一比例系数和第二比例系数,所述直流电压斜率为所述第一比例系数与第二比例系数的比值的相反数;

所述根据所述送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节所述直流电压斜率的步骤具体包括:

根据所述送端换流器的直流电压值与所述预设的稳定电压参考值之间的误差,通过所述 PI 控制算法获取第一输出量;

当所述第一输出量在所述第一比例系数的预设范围内,将所述第一比例系数更新为所述第一输出量;

当所述第一输出量大于所述第一比例系数的预设范围的上限时,将所述第一比例系数更新为所述第一比例系数的预设范围的上限;

当所述第一输出量小于所述第一比例系数的预设范围的下限时,将所述第一比例系数更新为所述第一比例系数的预设数范围的下限。

5. 根据权利要求 1 所述的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法,其特征在于,所述根据所述误差量,通过 PI 控制算法计算控制量具体包括步骤:

根据所述误差量,通过所述 PI 控制算法计算第二输出量;

当所述第二输出量在预设的控制量范围内,将所述控制量更新为所述第二输出量;

当所述第二输出量大于所述预设的控制量范围的上限时,将所述控制量更新为所述预设的控制量范围的上限;

当所述第二输出量小于所述预设的控制量范围的下限时,将所述控制量更新为所述预设的控制量范围的下限。

6. 一种多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统,所述多端柔性直流输电系统包括至少两个换流器,至少一个换流器作为送端,至少一个换流器作为受端,送端换流器与受端换流器通过直流输电线路连接,其特征在于,包括:

第一获取模块,用于当所述多端柔性直流输电系统运行不稳定时,获取所述送端换流器的直流电压值以及直流功率;

第一调节模块,用于根据所述送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率;

计算模块,用于根据所述直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、所述送端换流器的直流电压值、预设的直流功率控制输入值以及所述送端换流器的直流功率,计算误差量;

第二调节模块,用于根据所述误差量,通过 PI 控制算法计算控制量;

第三调节模块,用于根据所述控制量,计算所述送端换流器的调节直流功率;

第二获取模块,用于当所述调节直流功率在所述送端换流器预设的直流功率范围时,获取通过所述调节直流功率调节后的所述送端换流器的调节直流电压值;

判断模块,用于判断所述送端换流器的所述调节直流电压值与所述预设的稳定电压参考值是否相等;

若相等,则所述第一调节模块停止对所述直流电压斜率的调节,若不相等,则返回所述第一调节模块继续对所述直流电压斜率的调节。

7. 根据权利要求 6 所述的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统,其特征在于,所述直流电压斜率的控制参数包括第一比例系数和第二比例系数,所述直流电压斜率为所述第一比例系数与第二比例系数的比值的相反数;

所述计算模块计算所述误差量的公式具体为:

$$e_{rr} = k_p (P_0 - P_d) + k_u (U_0 - U_{dc \text{ common}});$$

式中,所述 e_{rr} 为所述误差量,所述 k_p 为所述第一比例系数,所述 k_u 为所述第二比例系数,所述 P_0 为所述预设的直流功率控制输入值,所述 P_d 为所述直流功率,所述 U_0 为所述预

设的直流电压控制输入值,所述 U_{ref} 为所述预设的稳定电压参考值。

8. 根据权利要求 6 所述的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统,其特征在于,还包括:

控制模块,用于当所述送端换流器的所述调节直流功率超出所述预设的直流功率范围的上限时,将所述调节直流功率更新为所述预设的直流功率范围的上限,当所述送端换流器的调节直流功率超出所述预设的直流功率范围的下限时,将所述调节直流功率更新为所述预设的直流功率范围的下限。

9. 根据权利要求 6 所述的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统,其特征在于,所述直流电压斜率的控制参数包括第一比例系数和第二比例系数,所述直流电压斜率为所述第一比例系数与第二比例系数的比值的相反数;

所述第一调节模块包括:

第一调节单元,用于根据所述送端换流器的直流电压值与所述预设的稳定电压参考值之间的误差,通过所述 PI 控制算法获取第一输出量;

第一更新单元,用于当所述第一输出量在所述第一比例系数的预设范围内,将所述第一比例系数更新为所述第一输出量;

当所述第一输出量大于所述第一比例系数的预设范围的上限时,将所述第一比例系数更新为所述第一比例系数的预设范围的上限;

当所述第一输出量小于所述第一比例系数的预设范围的下限时,将所述第一比例系数更新为所述第一比例系数的预设数范围的下限。

10. 根据权利要求 6 所述的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统,其特征在于,所述第二调节模块包括:

第二调节单元,用于根据所述误差量,通过所述 PI 控制算法输出第二输出量;

第二更新单元,用于当所述第二输出量在预设的控制量范围内,将所述控制量更新为所述第二输出量;

当所述第二输出量大于所述预设的控制量范围的上限时,将所述控制量更新为所述预设的控制量范围的上限;

当所述第二输出量小于所述预设的控制量范围的下限时,将所述控制量更新为所述预设的控制量范围的下限。

多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及电气领域,特别涉及一种多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法及系统。

背景技术

[0002] 多端直流输电系统能够实现多电源供电、多落点受电、孤岛供电以及实现分布式能源和风电并网。多端直流电网包含若干直流端,对直流输电系统来说,直流电压必须保持在一个限定的范围内以保证电源和负载的正常运行,否则会造成整个直流输电系统的崩溃。此外当某一个换流器因故障退出运行时,其余换流器能抵御一定的扰动,之后过渡到一个新的稳定运行点,所以如何控制各换流器以保证直流输电系统稳定运行并且完成供电功能是直流电网建设的重要研究课题。

[0003] 当多端直流输电系统不稳定时,多端直流系统的直流电压不再稳定,此时,需要对换流器的直流功率进行调整,控制直流电压稳定。传统的直流电压控制根据直流电压斜率调整换流器的直流功率,以满足直流输电系统对直流功率的需求,实现直流输电系统稳定运行,使直流电压保持在一个限定范围内运行。

[0004] 换流器可以根据其所测得的直流电压的数值时刻调整其直流功率的设定值,通过让不同的换流器选择不同的直流电压斜率来实现不同运行情况下各个功率的快速平衡和匹配,例如,当直流输电系统不稳定,直流电压下降时,根据直流电压斜率增加换流器的直流功率输入,直到直流输电系统稳定运行,实现系统内的功率平衡,不同的直流电压斜率,直流功率增加的直流功率不同。但是传统的直流电压控制会导致直流母线存在静态电压偏差,即直流输电系统再次达到稳定时的直流电压和出现故障前直流输电系统的直流电压会产生偏差,不能实现电压的恒定控制。

发明内容

[0005] 基于此,有必要针对利用现有方法不能实现电压恒定控制的问题,提供一种能实现功率平衡且电压恒定控制的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法及系统。

[0006] 一种多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法,所述多端柔性直流输电系统包括至少两个换流器,至少一个换流器作为送端,至少一个换流器作为受端,送端换流器与受端换流器通过直流输电线路连接,包括以下步骤:

[0007] 当所述多端柔性直流输电系统运行不稳定时,获取所述送端换流器的直流电压值以及直流功率;

[0008] 根据所述送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率;

[0009] 根据所述直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、所述送端换流器的直流电压值、预设的直流功率控制输入值以及所述送端换流器的直流功率,计算误差量;

[0010] 根据所述误差量,通过 PI 控制算法计算控制量;

- [0011] 根据所述控制量,计算所述送端换流器的调节直流功率;
- [0012] 当所述调节直流功率在所述送端换流器预设的直流功率范围时,获取通过所述调节直流功率调节后的所述送端换流器的调节直流电压值;
- [0013] 判断所述送端换流器的所述调节直流电压值与所述预设的稳定电压参考值是否相等;
- [0014] 若相等,则停止对所述直流电压斜率的调节;
- [0015] 若不相等,则返回所述根据所述送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率的步骤。
- [0016] 本发明还提供一种多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统,所述多端柔性直流输电系统包括至少两个换流器,至少一个换流器作为送端,至少一个换流器作为受端,送端换流器与受端换流器通过直流输电线路连接,包括:
- [0017] 第一获取模块,用于当所述多端柔性直流输电系统运行不稳定时,获取所述送端换流器的直流电压值以及直流功率;
- [0018] 第一调节模块,用于根据所述送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压
- [0019] 参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率;
- [0020] 计算模块,用于根据所述直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、所述送端换流器的直流电压值、预设的直流功率控制输入值以及所述送端换流器的直流功率,计算误差量;
- [0021] 第二调节模块,用于根据所述误差量,通过 PI 控制算法计算控制量;
- [0022] 第三调节模块,用于根据所述控制量,计算所述送端换流器的调节直流功率;
- [0023] 第二获取模块,用于当所述调节直流功率在所述送端换流器预设的直流功率范围时,获取通过所述调节直流功率调节后的所述送端换流器的调节直流电压值;
- [0024] 判断模块,用于判断所述送端换流器的所述调节直流电压值与所述预设的
- [0025] 稳定电压参考值是否相等;
- [0026] 若相等,则所述第一调节模块停止对所述直流电压斜率的调节,若不相等,则返回所述第一调节模块继续对所述直流电压斜率的调节。
- [0027] 上述多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法及系统,根据换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率,根据直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、直流电压值之间、预设的直流功率控制输入值以及直流功率,计算误差量,根据误差量,通过 PI 控制算法计算控制量,根据控制量,调节送端换流器的直流功率,从而实现对送端换流器的直流电压的调节,以减小送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差。在多端柔性直流输电系统的功率不平衡时,通过对直流电压斜率在多端柔性直流输电系统发生扰动时能够随着多端柔性直流输电系统的直流电压的偏差自适应地调节,不但能调节换流器的直流功率使多端柔性直流输电系统内功率平衡,稳定运行,而且能跟踪多端柔性直流输电系统的直流电压,维持多端柔性直流输电系统再次稳定时的直流电压不变,实现电压的恒定控制。

附图说明

- [0028] 图 1 为多端柔性直流输电系统的结构示意图;

- [0029] 图 2 为一种实施方式的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法的流程图；
- [0030] 图 3 为另一种实施方式的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法的子流程图；
- [0031] 图 4 为另一种实施方式的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法的子流程图；
- [0032] 图 5 为直流电压斜率控制框图；
- [0033] 图 6 为直流电压斜率曲线的示意图；
- [0034] 图 7 为直流电压斜率曲线上的稳定运行点变化图；
- [0035] 图 8 为直流功率仿真曲线图；
- [0036] 图 9 为直流电压仿真曲线图；
- [0037] 图 10 为直流电压斜率仿真曲线图；
- [0038] 图 11 为传统直流电压斜率控制方法的直流电压仿真图；
- [0039] 图 12 为一种实施方式的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统的模块图；
- [0040] 图 13 为一种实施方式的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统的子模块图；
- [0041] 图 14 为一种实施方式的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统的子模块图。

具体实施方式

[0042] 请参阅图 1, 多端柔性直流输电系统包括至少两个换流器, 至少一个换流器作为送端, 至少一个换流器作为受端, 送端换流器与受端换流器通过直流输电线路连接, 各送端换流器通过公共点将直流电输送至直流输电线路, 通过直流输电线路将直流电输送至各受端换流器。在本实施例中, 多端柔性直流输电系统包括 4 个换流器, 其中, 2 个换流器作为送端换流器, 其他 2 个换流器作为受端换流器。换流器可实现交流电变换为直流电或者将直流电变换为交流电的转换, 送端换流器从交流电网接收交流电, 并将交流电转换为直流电, 2 个送端换流器将直流电通过公共点传送至直流输电线路, 通过直流输电线路将直流电输送给受端换流器, 相当于整流器的作用, 受端换流器接收到直流电后将其转换为交流电, 输送给交流电网, 相当于逆变器的作用, 通过送端换流器与受端换流器之间的输电, 实现两个交流电网的输电。送端换流器和受端换流器可换用, 即受端换流器需要将电输送给送端换流器实现两个交流电网的输电过程与上述过程类似。

[0043] 请参阅图 2, 提供一种实施方式的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法, 包括以下步骤:

[0044] S100: 当多端柔性直流输电系统运行不稳定时, 获取送端换流器的直流电压值以及直流功率。

[0045] 多端柔性直流输电系统中的送端换流器或受端换流器出现故障, 会导致多端柔性直流输电系统出现故障或者发生扰动, 使多端柔性直流输电系统中的输出功率和吸收功率不平衡, 从而使多端柔性直流输电系统运行不稳定, 即多端柔性直流输电系统的直流电压

值不再运行在一个稳定值上,直流电压值会不断发生改变,直流电压值的不断改变对多端柔性直流输电系统会造成一定的损害,甚至使多端柔性直流输电系统崩溃,从而需要通过送端换流器的直流电压斜率进行控制,使多端柔性直流输电系统中的输出功率和吸收功率平衡,并控制多端柔性直流输电系统的直流电压值稳定运行在稳定点。

[0046] 多端柔性直流输电系统传输的直流电由各送端换流器通过公共点提供,公共点的直流电压值即是多端柔性直流输电系统的直流电压值,公共点的直流电压值也表示各送端换流器的直流电压值,即各送端换流器的直流电压值是相同的,均为公共点的直流电压值,获取送端换流器的直流电压值也就是获取了公共点的直流电压值,同样也就获取了多端柔性直流输电系统的直流电压。

[0047] S200:根据送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过PI控制算法调节直流电压斜率。

[0048] 在多端柔性直流输电系统出现故障前,多端柔性直流输电系统的直流电压值维持为预设的稳定电压参考值,直流电压值与预设的稳定电压参考值是相等的。当多端柔性直流输电系统出现故障,直流电压值与预设的稳定电压参考值会产生偏差,从而需要通过控制直流电压斜率的大小,以使直流电压值接近预设的稳定电压参考值。

[0049] PI控制算法是PI调节器的一种控制算法,根据给定值与实际输出值构成控制偏差,将控制偏差的比例和积分通过线性组合构成控制量,利用控制量对被控对象进行控制。在通过PI控制算法调节直流电压斜率时,PI控制算法的给定值为预设的稳定电压参考值,实际输出值为直流电压值,通过PI控制算法输出调节直流电压斜率。

[0050] S300:根据直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、送端换流器的直流电压值、预设的直流功率控制输入值以及换流器的直流功率,计算误差量。

[0051] 误差量的计算用到了预设的直流电压控制输入值与直流电压值之间的差值以及预设的直流功率控制输入值与直流功率的差值,既考虑了电压偏差,也考虑了功率偏差,当多端柔性直流输电系统运行稳定时,误差量为0。

[0052] S400:根据误差量,通过PI控制算法计算控制量。

[0053] 根据误差量,通过PI控制算法计算控制量后,利用控制量对被控对象即送端换流器进行控制,调节换流器的直流功率。

[0054] S500:根据控制量,计算送端换流器的调节直流功率。

[0055] 通过PI控制算法计算控制量后,将控制量作用于控制对象即控制送端换流器,调节送端换流器的直流功率,送端换流器的调节直流功率即是调节后送端换流器的直流功率,从而调节送端换流器的直流电压,以使送端换流器的直流电压值靠近预设的稳定电压参考值,减小送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差。

[0056] S600:当调节直流功率在送端换流器预设的直流功率范围,获取通过调节直流功率调节后的送端换流器的调节直流电压值。

[0057] 送端换流器预设的直流功率范围是由送端换流器能输出的功率以及能吸收的功率决定的,其中,送端换流器预设的直流功率范围的上限为送端换流器能输出的最大功率,送端换流器预设的直流功率范围的下限为送端换流器能吸收的最大功率的相反数。送端换流器能吸收的最大功率的相反数是一个负数,负数用于表示送端换流器用作逆变器,用于吸收功率。

[0058] S700 :判断送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值是否相等。

[0059] 若相等,则执行步骤 S800,若不相等,则返回步骤 S200。

[0060] S800 :停止对直流电压斜率的调节。

[0061] 每个送端换流器具有自身可调节的功率范围,即送端换流器预设的直流功率范围,在调节直流功率没有超出送端换流器预设的直流功率范围时,且送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值相等时,表示送端换流器在不超出其预设的直流功率范围即可实现多端柔性直流输电系统的稳定运行,且送端换流器的调节直流电压值运行在预设的稳定电压参考值点。

[0062] 当送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值不相等时,表示送端换流器的直流功率还需调节才能实现送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值相等,才能实现多端柔性直流输电系统稳定运行,一直调节直到送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值相等,或者直到调节直流功率超过预设的直流功率范围。

[0063] 在返回步骤 S200 的情况下,返回后通过再次获取实时的所述送端换流器的直流电压值以及直流功率,并按照相同的执行步骤再次调整直流电压斜率,如此往复循环可能包括多次,直至在判断送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值相等的条件满足时,才停止对所述直流电压斜率的调节。

[0064] 上述多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法,根据换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率,根据直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、直流电压值之间、预设的直流功率控制输入值以及直流功率,计算误差量,根据误差量,通过 PI 控制算法计算控制量,根据控制量,调节送端换流器的直流功率,从而实现对送端换流器的直流电压的调节,以减小送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差。在多端柔性直流输电系统的功率不平衡时,通过对直流电压斜率在多端柔性直流输电系统发生扰动时能够随着多端柔性直流输电系统的直流电压的偏差自适应地调节,不但能调节换流器的直流功率使多端柔性直流输电系统内功率平衡,稳定运行,而且能跟踪多端柔性直流输电系统的直流电压,维持多端柔性直流输电系统再次稳定时的直流电压不变,实现电压的恒定控制。

[0065] 在其中一个实施例中,直流电压斜率的控制参数包括第一比例系数和第二比例系数,直流电压斜率为第一比例系数与第二比例系数的比值的相反数。

[0066] 其中,计算误差量的公式具体为:

$$[0067] \quad e_{rr} = k_p (P_0 - P_d) + k_u (U_0 - U_{dc \text{ common}})。$$

[0068] 式中, e_{rr} 为误差量, k_p 为第一比例系数, k_u 为第二比例系数, P_0 为预设的直流功率控制输入值, P_d 为直流功率, U_0 为预设的直流电压控制输入值, U_{ref} 为预设的稳定电压参考值。

[0069] 由于控制直流电压斜率的参数包括第一比例系数以及第二比例系数,直流电压斜率表示为第一比例系数的相反数除以第二比例系数,通过调节第一比例系数的大小,可调节直流电压斜率的大小,第二比例系数可预先获取,一般采用定值,在一较佳实施例中,第二比例系数取值为 1。

[0070] 在其中一个实施例中,根据控制量,计算送端换流器的调节直流功率的步骤 S500 之后还包括步骤:

[0071] 当送端换流器的调节直流功率超出预设的直流功率范围的上限时,将调节直流功率更新为预设的直流功率范围的上限;

[0072] 当送端换流器的调节直流功率超出预设的直流功率范围的下限时,将调节直流功率更新为预设的直流功率范围的下限。

[0073] 每个送端换流器对应有各自的直流功率范围,送端换流器超过直流功率范围运行时,会给送端换流器带来损害甚至崩溃,所以为了使直流电压的值运行在预设的稳定电压参考点调节直流功率时,不得超过其直流功率范围,一旦超过,保持送端换流器的调节直流功率为预设的直流功率范围的上限或下限不变。即当送端换流器的调节直流功率超出预设的直流功率范围时,该送端换流器采用定功率控制,保持送端换流器的功率不变。其中,当送端换流器的调节直流功率大于预设的直流功率范围的上限,则将送端换流器的调节直流功率更新为预设的直流功率范围的上限,当送端换流器的调节直流功率小于预设的直流功率范围的下限,则将送端换流器的调节直流功率更新为预设的直流功率范围的下限。

[0074] 在其中一个实施例中,根据送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过PI控制算法调节直流电压斜率的步骤200之前还包括步骤:

[0075] 根据第一比例系数的预设范围、第二比例系数、送端换流器预设的直流功率范围以及预设的稳定电压参考值,确定预设的直流电压控制输入值以及预设的直流功率控制输入值;

[0076] 其中,确定预设的直流电压控制输入值以及预设的直流功率控制输入值的具体公式为:

$$[0077] \quad P_0 = \frac{k_{p\text{-max}} P_{\min} - k_{p\text{-min}} P_{\max}}{k_{p\text{-max}} - k_{p\text{-min}}}。$$

$$[0078] \quad U_0 = U_{\text{ref}} + \frac{k_{p\text{-max}} k_{p\text{-min}} (P_{\max} - P_{\min})}{k_u (k_{p\text{-max}} - k_{p\text{-min}})}。$$

[0079] 式中, $k_{p\text{-max}}$ 为第一比例系数的预设范围的上限, $k_{p\text{-min}}$ 为第一比例系数的预设范围的下限, P_{\min} 为送端换流器预设的直流功率范围的下限, P_{\max} 为送端换流器预设的直流功率范围的上限。

[0080] 在实际应用过程中,在直流电压斜率可调范围内的电压斜率曲线有一个交点,该交点的直流电压和直流功率分别是预设的直流电压控制输入值以及预设的直流功率,可根据第一比例系数的预设范围、第二比例系数、送端换流器预设的直流功率范围以及预设的稳定电压参考值确定。该交点即是控制过程中的输入参考点,即该点的直流电压为与送端换流器的直流电压进行比较的参考值,该点的直流功率为与送端换流器的直流功率进行比较的参考值,后续对第二比例系数进行调节,实现直流电压斜率的调节过程中,直流电压斜率均进过该点。当直流斜率最大时,其对应多端柔性直流输电系统稳定运行点为 $(P_{\max}, U_{\text{ref}})$, 当直流斜率最小时,其对应多端柔性直流输电系统稳定运行点为 $(P_{\min}, U_{\text{ref}})$, 当多端柔性直流输电系统稳定工作时,误差量是为0,从而通过如下公式可确定预设的直流电压控制输入值以及预设的直流功率控制输入值。

$$[0081] \quad 0 = k_{p\text{-min}} (P_0 - P_{\max}) + k_u (U_0 - U_{\text{ref}}) ;$$

$$[0082] \quad 0 = k_{p\text{-max}} (P_0 - P_{\min}) + k_u (U_0 - U_{\text{ref}}) 。$$

[0083] 请参阅图 3, 在其中一个实施例中, 直流电压斜率的控制参数包括第一比例系数和第二比例系数, 直流电压斜率为第一比例系数与第二比例系数的比值的相反数。

[0084] 根据送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差, 通过 PI 控制算法调节直流电压斜率的步骤 S200 具体包括步骤:

[0085] S210: 根据送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差, 通过 PI 控制算法获取第一输出量;

[0086] S220: 当第一输出量在第一比例系数的预设范围内, 将第一比例系数更新为第一输出量;

[0087] S230: 当第一输出量大于第一比例系数的预设范围的上限时, 将第一比例系数更新为第一比例系数的预设范围的上限;

[0088] S240: 当第一输出量小于第一比例系数的预设范围的下限时, 将第一比例系数更新为第一比例系数的预设数范围的下限。

[0089] 通过上述对第一比例系数的更新过程, 可确保第一比例系数控制在第一比例系数的预设范围内, 确保直流电压斜率在一定范围内调节。

[0090] 请参阅图 4, 在其中一个实施例中, 根据误差量, 通过 PI 控制算法计算控制量 S400 具体包括步骤:

[0091] S410: 根据误差量, 通过 PI 控制算法计算第二输出量;

[0092] S420: 当第二输出量在预设的控制量范围内, 将控制量更新为第二输出量;

[0093] S430: 当第二输出量大于预设的控制量范围的上限时, 将控制量更新为预设的控制量范围的上限;

[0094] S440: 当第二输出量小于预设的控制量范围的下限时, 将控制量更新为预设的控制量范围的下限。

[0095] 通过上述对控制量的更新过程, 可确保控制量控制在预设的控制量范围内。

[0096] 下面以具体实施例对上述直流系统的直流电压斜率控制方法加以说明。

[0097] 如图 1 所示, 采用四端柔性直流输电系统, 具有 4 个换流器, 换流器 VSC3 和 VSC4 为受端换流器, 采用定功率控制, 换流器 VSC1 和 VSC2 为送端换流器, 采用本实施例多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制方法进行控制, 在具体应用中, 采用控制器进行控制, 控制器框图如图 5 所示, 其结合了直流电压控制与直流功率控制的特点, 在实现对换流器的输入直流功率控制的同时也维持了直流电压的恒定。图中控制器的输出为:

$$[0098] \quad e_{rr} = k_p (P_0 - P_d) + k_u (U_0 - U_{dc \text{ common}});$$

[0099] 式中, k_p 、 k_u 为直流电压斜率控制器的比例系数, 且 $-k_p/k_u$ 为直流电压斜率。通过改变 k_p 或 k_u 的值, 便可改变斜率大小, 当 $k_p = 0$ 时, 直流电压斜率控制器等效为定直流电压控制器; 当 $k_u = 0$ 时, 直流电压斜率控制器等效为定功率控制器。具体地, k_u 取值为 1, 根据系统公共点处直流电压 $U_{dc \text{ common}}$ 与参考电压 U_{ref} 的差值通过一个 PI 控制器来实时地调节 k_p 的值, 从而实现对直流电压斜率的调节。

[0100] P_0 和 U_0 的值则需要通过换流器能输出和吸收的功率范围以及保持多端柔性直流输电系统稳定的最大直流电压斜率以及最小直流电压斜率来确定。如图 6 所示, 换流器向系统输出功率, 即为整流状态, 向系统吸收功率, 即为逆变状态。换流器能输出的最大功率为 P_{max} , 能吸收的最大功率的相反数为 P_{min} , 预设的稳定电压参考值为 U_{ref} , 当直流电压斜率

最小时斜率曲线过点 $(P_{\min}, U_{\text{ref}})$, 直流电压斜率最大时斜率曲线过点 $(P_{\max}, U_{\text{ref}})$, 两直线交点即为 (P_0, U_0) , 因此可列如下方程:

$$[0101] \quad 0 = k_{p_{\min}}(P_0 - P_{\max}) + k_u(U_0 - U_{\text{ref}});$$

$$[0102] \quad 0 = k_{p_{\max}}(P_0 - P_{\min}) + k_u(U_0 - U_{\text{ref}})。$$

[0103] 求解可得:

$$[0104] \quad P_0 = \frac{k_{p_{\max}} P_{\min} - k_{p_{\min}} P_{\max}}{k_{p_{\max}} - k_{p_{\min}}}。$$

$$[0105] \quad U_0 = U_{\text{ref}} + \frac{k_{p_{\max}} k_{p_{\min}} (P_{\max} - P_{\min})}{k_u (k_{p_{\max}} - k_{p_{\min}})}。$$

[0106] 确定了 P_0 和 U_0 后, 可以根据多端柔性直流输电系统正常运行时各换流站的直流功率 P_{default} 来确定初始的直流电压斜率值 k_0 。即多端柔性直流输电系统稳态运行时段内, 初始斜率 k_0 的作用使得注入多端柔性直流输电系统的功率为 P_{default} 。

[0107] 如图 7 所示, 在多端柔性直流输电系统正常运行过程中, 某一端换流器运行在 A 点, 直流电压斜率为 k_1 , 向输出有功功率为 P_{def} 。当某一时刻发生故障或其他扰动导致整个多端柔性直流输电系统输入到直流网络的有功功率突然减少, 此时多端柔性直流输电系统的直流电压下降。对于传统下垂控制, 换流站会随着多端柔性直流输电系统的直流电压的下降而增加换流站的有功输出, 直到多端柔性直流输电系统的功率达到平衡, 此时换流站运行在 B 点, 多端柔性直流输电系统的直流电压产生一定偏差。而采用本实施例的直流电压斜率控制方法时, 控制器会根据多端柔性直流输电系统的直流电压与稳定电压参考值的误差来不断调节直流电压斜率, 同时也不断调节输出有功功率, 直到多端柔性直流输电系统的功率达到平衡, 稳定时, 到达 C 点运行, 系统电压回到 U_{ref} 。同理, 反之亦然。

[0108] 为了验证本实施例采取的实施方案的可行性和有效性, 利用电力系统的实时数字仿真器 (RTDS) 搭建了基于模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 的四端柔性直流输电系统模型, 对本实施例的技术方案进行仿真。该四端柔性直流输电系统采用“两送两受”的运行方式, 功率送端 VSC1 和功率送端 VSC2 采用本实施例的直流电压斜率控制方法, 功率受端 VSC3 和功率受端 VSC4 采用定有功功率控制方法。送端和受端交流系统的额定电压等级分别为 380kV 和 145kV, 模块化多电平换流器单元采用 200 个子模块, 多端柔性直流输电系统预设的稳定电压参考值为 200kV, 正常运行时功率送端 VSC1 和功率送端 VSC2 输送的功率分别为 100MW 和 150MW, 受端 VSC3 的容量为 200MW, 功率受端 VSC4 的额定容量为 300MW。第一比例系数的预设范围选择为 0.05 ~ 0.2 之间, 第二比例系数选择为 1, 从而直流电压斜率的范围选取为 -0.2 ~ -0.05 之间, 这样可以更好地控制直流功率, 而且在小扰动情况下系统不会发生振荡。

[0109] 请参阅图 8, 系统稳态运行时段内, 初始斜率的作用使得功率送端 VSC1 和功率送端 VSC2 经过分配注入多端柔性直流输电系统的功率为 100MW 和 150MW, VSC3 和 VSC4 分别向多端柔性直流输电系统的吸收的功率为 100MW 和 150MW, 多端柔性直流输电系统的输出功率和吸收功率平衡, 多端柔性直流输电系统功率达到平衡。图 8 中功率值正号表示输出功率, 功率值前的负号表示为吸收。系统运行至 3s, 功率受端 VSC4 由于故障退出运行, 由于 VSC4 故障突变, VSC4 吸收的功率变为 0, VSC3 采用定功率控制方法, 其吸收的功率不变, 注

入多端柔性直流输电系统的功率大于从多端柔性直流输电系统吸收的功率,多端柔性直流输电系统的直流电压升高,此时控制 VSC1 和 VSC2 的直流电压斜率的控制器调节直流电压斜率,如图 8 所示,使得送端换流器 VSC1 和 VSC2 的输出功率不断减小,直流电压也不断下降,如图 9 所示,最后达到稳定维持在 200kV,其中,图 10 中的 k_{v1} 和 k_{v2} 分别为 VSC1 和 VSC2 的直流电压斜率的绝对值。与图 11 传统控制下的电压对比,可明显看出本实施例的技术方案的能更好地控制多端柔性直流输电系统的直流电压的恒定。

[0110] 请参阅图 12,提供一种实施方式的多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统,其中,多端柔性直流输电系统包括至少两个换流器,至少一个换流器作为送端,至少一个换流器作为受端,送端换流器与受端换流器通过直流输电线路连接。

[0111] 上述多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统包括:

[0112] 第一获取模块 100,用于当多端柔性直流输电系统运行不稳定时,获取送端换流器的直流电压值以及直流功率。

[0113] 多端柔性直流输电系统中的送端换流器或受端换流器出现故障,会导致多端柔性直流输电系统出现故障或者发生扰动,使多端柔性直流输电系统中的输出功率和吸收功率不平衡,从而使多端柔性直流输电系统运行不稳定,即多端柔性直流输电系统的直流电压值不再运行在一个稳定值上,直流电压值会不断发生改变,直流电压值的不断改变对多端柔性直流输电系统会造成一定的损害,甚至使多端柔性直流输电系统崩溃,从而需要通过控制送端换流器的直流电压斜率进行控制,使多端柔性直流输电系统中的输出功率和吸收功率平衡,并控制多端柔性直流输电系统的直流电压值稳定运行在稳定点。

[0114] 多端柔性直流输电系统传输的直流电由各送端换流器通过公共点提供,公共点的直流电压值即是多端柔性直流输电系统的直流电压值,公共点的直流电压值也表示各送端换流器的直流电压值,即各送端换流器的直流电压值是相同的,均为公共点的直流电压值,获取送端换流器的直流电压值也就是获取了公共点的直流电压值,同样也就获取了多端柔性直流输电系统的直流电压。

[0115] 第一调节模块 200,用于根据送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率。

[0116] 在多端柔性直流输电系统出现故障前,多端柔性直流输电系统的直流电压值维持为预设的稳定电压参考值,直流电压值与预设的稳定电压参考值是相等的。当多端柔性直流输电系统出现故障,直流电压值与预设的稳定电压参考值会产生偏差,从而需要通过控制直流电压斜率的大小,以使直流电压值接近预设的稳定电压参考值。

[0117] PI 控制算法是 PI 调节器的一种控制算法,根据给定值与实际输出值构成控制偏差,将控制偏差的比例和积分通过线性组合构成控制量,利用控制量对被控对象进行控制。在通过 PI 控制算法调节直流电压斜率时,PI 控制算法的给定值为预设的稳定电压参考值,实际输出值为直流电压值,通过 PI 控制算法输出调节直流电压斜率。

[0118] 计算模块 300,用于根据直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、送端换流器的直流电压值、预设的直流功率控制输入值以及送端换流器的直流功率,计算误差量。

[0119] 误差量的计算用到了预设的直流电压控制输入值与直流电压值之间的差值以及预设的直流功率控制输入值与直流功率的差值,既考虑了电压偏差,也考虑了功率偏差,当多端柔性直流输电系统运行稳定时,误差量为 0。

[0120] 第二调节模块 400,用于根据误差量,通过 PI 控制算法计算控制量。

[0121] 根据误差量,通过 PI 控制算法计算控制量后,利用控制量对被控对象即送端换流器进行控制,调节换流器的直流功率。

[0122] 第三调节模块 500,用于根据控制量,计算送端换流器的调节直流功率。

[0123] 通过 PI 控制算法计算控制量后,将控制量作用于控制对象即控制送端换流器,调节送端换流器的直流功率,送端换流器的调节直流功率即是调节后送端换流器的直流功率,从而调节送端换流器的直流电压,以使送端换流器的直流电压值靠近预设的稳定电压参考值,减小送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差。

[0124] 第二获取模块 600,用于当送端换流器的调节直流功率在送端换流器预设的直流功率范围时,获取通过调节直流功率调节后的送端换流器的调节直流电压值。

[0125] 送端换流器预设的直流功率范围是由送端换流器能输出的功率以及能吸收的功率决定的,其中,送端换流器预设的直流功率范围的上限为送端换流器能输出的最大功率,送端换流器预设的直流功率范围的下限为送端换流器能吸收的最大功率的相反数。送端换流器能吸收的最大功率的相反数是一个负数,负数用于表示送端换流器用作逆变器,用于吸收功率。

[0126] 判断模块 700,用于判断送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值是否相等。

[0127] 若相等,则第一调节模块 200 停止对直流电压斜率的调节,若不相等,则返回第一调节模块 200 继续对直流电压斜率的调节。

[0128] 每个送端换流器具有自身可调节的功率范围,即送端换流器预设的直流功率范围,在调节直流功率没有超出送端换流器预设的直流功率范围时,且送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值相等时,表示送端换流器在不超出其预设的直流功率范围即可实现多端柔性直流输电系统的稳定运行,且送端换流器的调节直流电压值运行在预设的稳定电压参考值点。

[0129] 当送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值不相等时,表示送端换流器的直流功率还需调节才能实现送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值相等,才能实现多端柔性直流输电系统稳定运行,一直调节直到送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值相等,或者直到调节直流功率超过预设的直流功率范围。

[0130] 在返回第一调节模块 200 的情况下,返回后通过再次获取实时的所述送端换流器的直流电压值以及直流功率,并按照相同的处理方式再次调整直流电压斜率,如此往复循环可能包括多次,直至在判断送端换流器的调节直流电压值与预设的稳定电压参考值相等的条件满足时,才停止对所述直流电压斜率的调节。

[0131] 上述多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统,根据换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差,通过 PI 控制算法调节直流电压斜率,根据直流电压斜率、预设的直流电压控制输入值、直流电压值之间、预设的直流功率控制输入值以及直流功率,计算误差量,根据误差量,通过 PI 控制算法计算控制量,根据控制量,调节送端换流器的直流功率,从而实现对送端换流器的直流电压的调节,以减小送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差。在多端柔性直流输电系统的功率不平衡时,通过对直流电压斜率在多端柔性直流输电系统发生扰动时能够随着多端柔性直流输电系统的直

流电压的偏差自适应地调节,不但能调节换流器的直流功率使多端柔性直流输电系统内功率平衡,稳定运行,而且能跟踪多端柔性直流输电系统的直流电压,维持多端柔性直流输电系统再次稳定时的直流电压不变,实现电压的恒定控制。

[0132] 在其中一个实施例中,直流电压斜率的控制参数包括第一比例系数和第二比例系数,直流电压斜率为第一比例系数与第二比例系数的比值的相反数。

[0133] 其中,计算误差量的公式具体为:

$$[0134] \quad e_{rr} = k_p(P_0 - P_d) + k_u(U_0 - U_{dc_common});$$

[0135] 式中, e_{rr} 为误差量, k_p 为第一比例系数, k_u 为第二比例系数, P_0 为预设的直流功率控制输入值, P_d 为直流功率, U_0 为预设的直流电压控制输入值, U_{ref} 为预设的稳定电压参考值。

[0136] 由于控制直流电压斜率的参数包括第一比例系数以及第二比例系数,直流电压斜率表示为第一比例系数的相反数除以第二比例系数,通过调节第一比例系数的大小,可调节直流电压斜率的大小,第二比例系数可预先获取,一般采用定值,在一较佳实施例中,第二比例系数取值为1。

[0137] 在其中一个实施例中,上述多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统还包括:

[0138] 控制模块,用于当送端换流器的调节直流功率超出预设的直流功率范围的上限时,将调节直流功率更新为预设的直流功率范围的上限,当送端换流器的调节直流功率超出预设的直流功率范围的下限时,将调节直流功率更新为预设的直流功率范围的下限。

[0139] 每个送端换流器对应有自己的直流功率范围,送端换流器超过直流功率范围运行时,会给送端换流器带来损害甚至崩溃,所以为了使直流电压的值运行在预设的稳定电压参考点调节直流功率时,不得超过其直流功率范围,一旦超过,保持送端换流器的调节直流功率为预设的直流功率范围的上限或下限不变。即当送端换流器的调节直流功率超出预设的直流功率范围时,该送端换流器采用定功率控制,保持送端换流器的功率不变。其中,当送端换流器的调节直流功率大于预设的直流功率范围的上限,则将送端换流器的调节直流功率更新为预设的直流功率范围的上限,当送端换流器的调节直流功率小于预设的直流功率范围的下限,则将送端换流器的调节直流功率更新为预设的直流功率范围的下限。

[0140] 在其中一个实施例中,上述多端柔性直流输电系统的直流电压斜率控制系统还包括:

[0141] 确定模块,用于根据第一比例系数的预设范围、第二比例系数、送端换流器预设的直流功率范围以及预设的稳定电压参考值,确定预设的直流电压控制输入值以及预设的直流功率控制输入值。

[0142] 其中,确定预设的直流电压控制输入值以及预设的直流功率控制输入值的具体公式为:

$$[0143] \quad P_0 = \frac{k_{p_max} P_{min} - k_{p_min} P_{max}}{k_{p_max} - k_{p_min}};$$

$$[0144] \quad U_0 = U_{ref} + \frac{k_{p_max} k_{p_min} (P_{max} - P_{min})}{k_u (k_{p_max} - k_{p_min})};$$

[0145] 式中, k_{p_max} 为第一比例系数的预设范围的上限, k_{p_min} 为第一比例系数的预设范围

的下限, P_{\min} 为送端换流器预设的直流功率范围的下限, P_{\max} 为送端换流器预设的直流功率范围的上限。

[0146] 在实际应用过程中, 在直流电压斜率可调范围内的电压斜率曲线有一个交点, 该交点的直流电压和直流功率分别是预设的直流电压控制输入值以及预设的直流功率, 可根据第一比例系数的预设范围、第二比例系数、送端换流器预设的直流功率范围以及预设的稳定电压参考值确定。该交点即是控制过程中的输入参考点, 即该点的直流电压为与送端换流器的直流电压进行比较的参考值, 该点的直流功率为与送端换流器的直流功率进行比较的参考值, 后续对第二比例系数进行调节, 实现直流电压斜率的调节过程中, 直流电压斜率均经过该点。当直流斜率最大时, 其对应多端柔性直流输电系统稳定运行点为 $(P_{\max}, U_{\text{ref}})$, 当直流斜率最小时, 其对应多端柔性直流输电系统稳定运行点为 $(P_{\min}, U_{\text{ref}})$, 当多端柔性直流输电系统稳定工作时, 误差量是为 0, 从而通过如下公式可确定预设的直流电压控制输入值以及预设的直流功率控制输入值。

$$[0147] \quad 0 = k_{p_{\min}}(P_0 - P_{\max}) + k_u(U_0 - U_{\text{ref}});$$

$$[0148] \quad 0 = k_{p_{\max}}(P_0 - P_{\min}) + k_u(U_0 - U_{\text{ref}})。$$

[0149] 请参阅图 13, 在其中一个实施例中, 直流电压斜率的控制参数包括第一比例系数和第二比例系数, 直流电压斜率为第一比例系数与第二比例系数的比值的相反数。第一调节模块 200 包括:

[0150] 第一调节单元 210, 用于根据送端换流器的直流电压值与预设的稳定电压参考值之间的误差, 通过 PI 控制算法获取第一输出量。

[0151] 第一更新单元 220, 用于当第一输出量在第一比例系数的预设范围内, 将第一比例系数更新为第一输出量;

[0152] 当第一输出量大于第一比例系数的预设范围的上限时, 将第一比例系数更新为第一比例系数的预设范围的上限;

[0153] 当第一输出量小于第一比例系数的预设范围的下限时, 将第一比例系数更新为第一比例系数的预设数范围的下限。

[0154] 通过上述对第一比例系数的更新过程, 可确保第一比例系数控制在第一比例系数的预设范围内, 确保直流电压斜率在一定范围内调节。

[0155] 请参阅图 14, 在其中一个实施例中, 第二调节模块 400 包括:

[0156] 第二调节单元 410, 用于根据误差量, 通过 PI 控制算法计算第二输出量。

[0157] 第二更新单元 420, 用于当第二输出量在预设的控制量范围内, 将控制量更新为第二输出量;

[0158] 当第二输出量大于预设的控制量范围的上限时, 将控制量更新为预设的控制量范围的上限;

[0159] 当第二输出量小于预设的控制量范围的下限时, 将控制量更新为预设的控制量范围的下限。

[0160] 通过上述对控制量的更新过程, 可确保控制量控制在预设的控制量范围内。

[0161] 以上实施例的各技术特征可以进行任意的组合, 为使描述简洁, 未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述, 然而, 只要这些技术特征的组合不存在矛盾, 都应当认为是本说明书记载的范围。

[0162] 以上实施例仅表达了本发明的几种实施方式,其描述较为具体和详细,但并不能因此而理解为对发明专利范围的限制。应当指出的是,对于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。因此,本发明专利的保护范围应以所附权利要求为准。

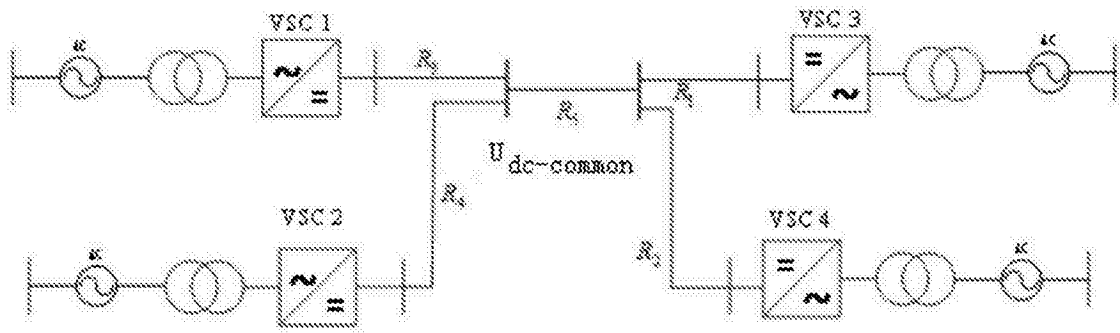


图 1

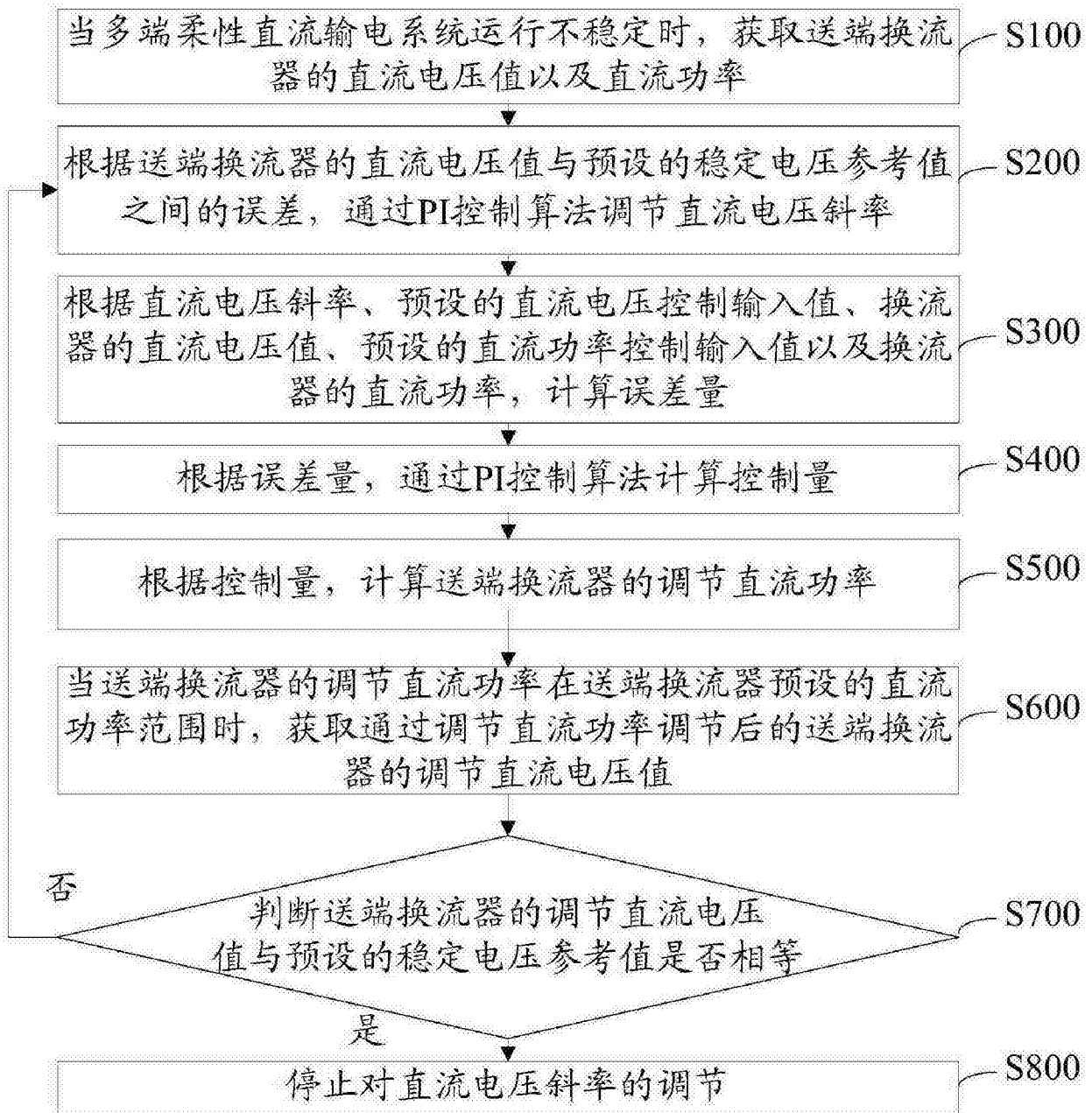


图 2

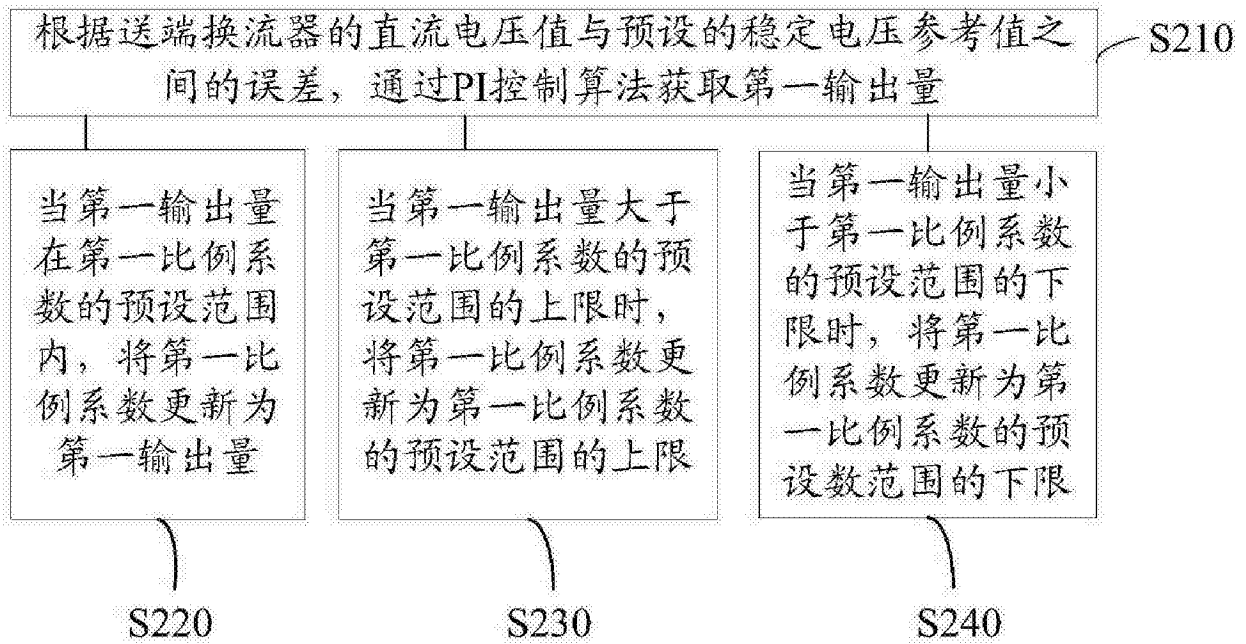


图 3

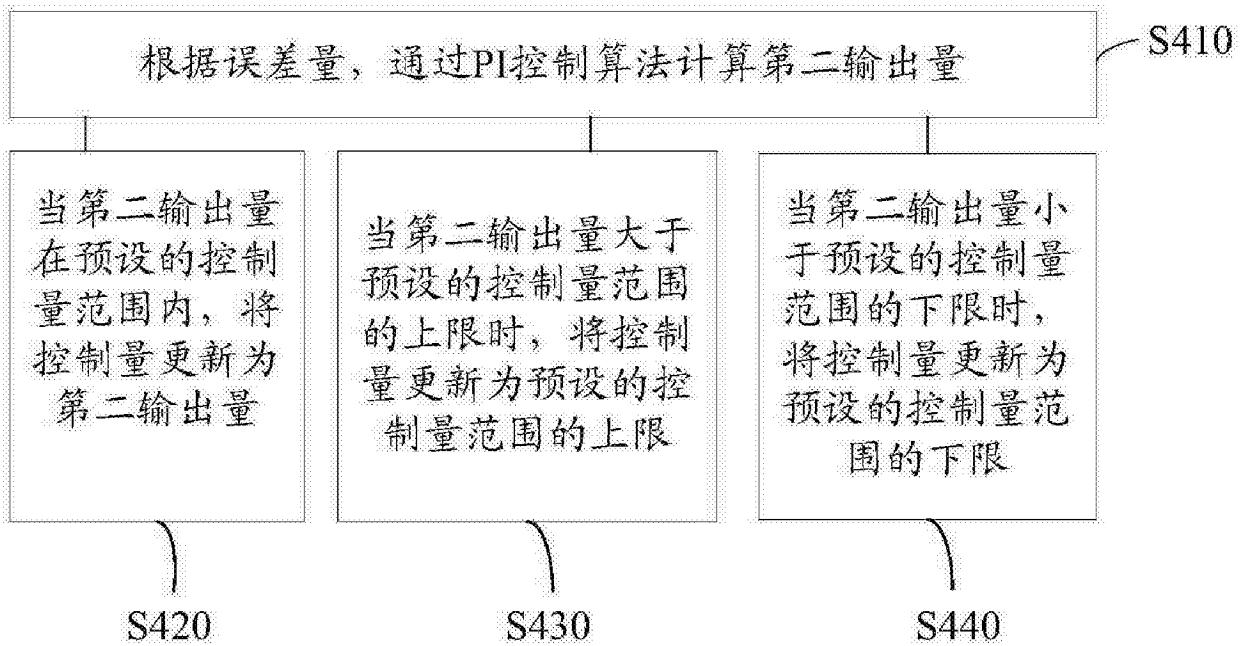


图 4

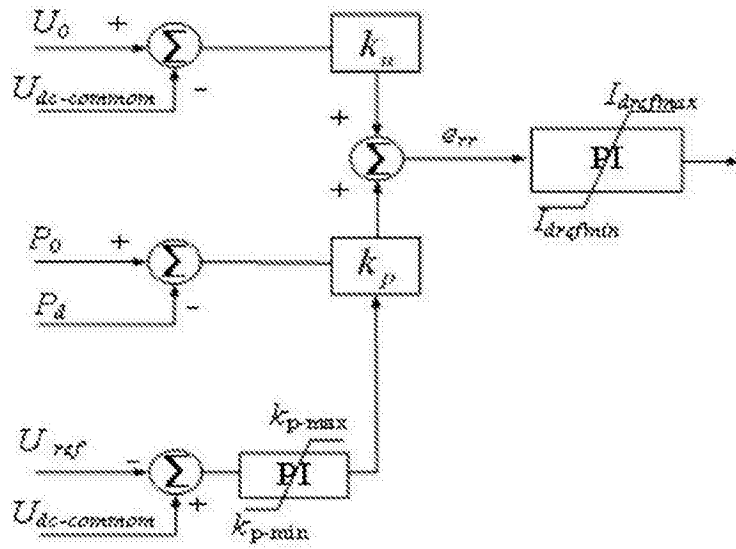


图 5

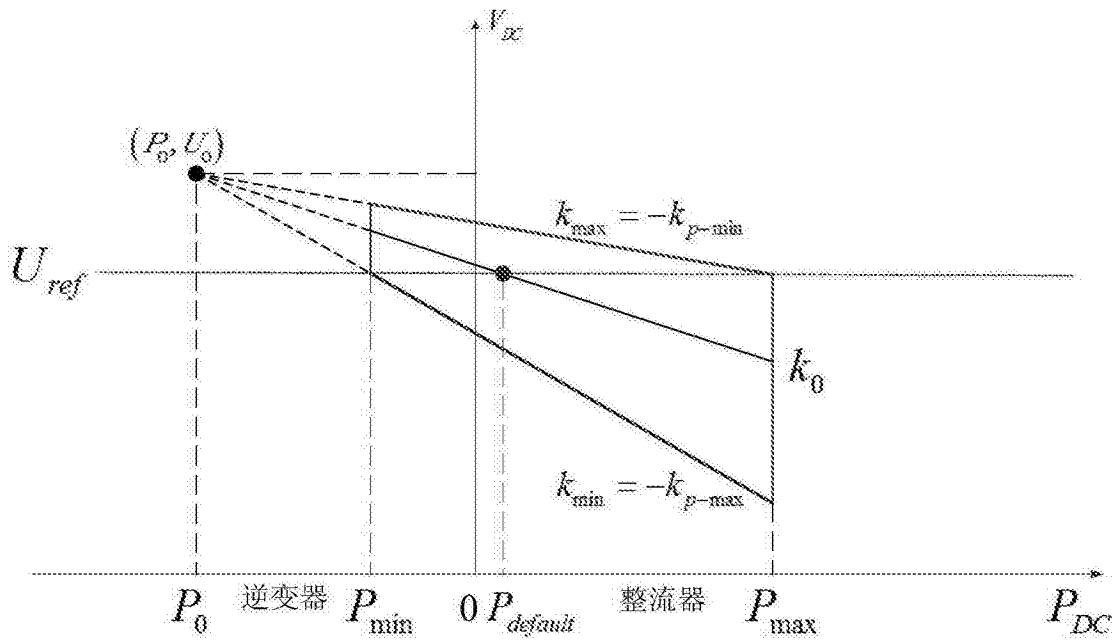


图 6

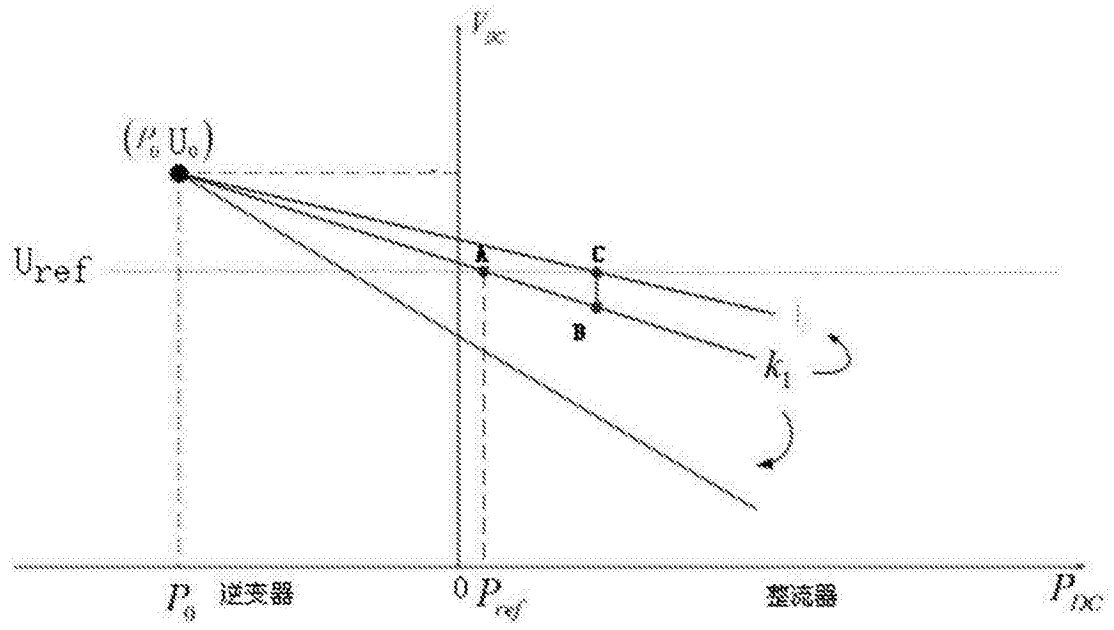


图 7

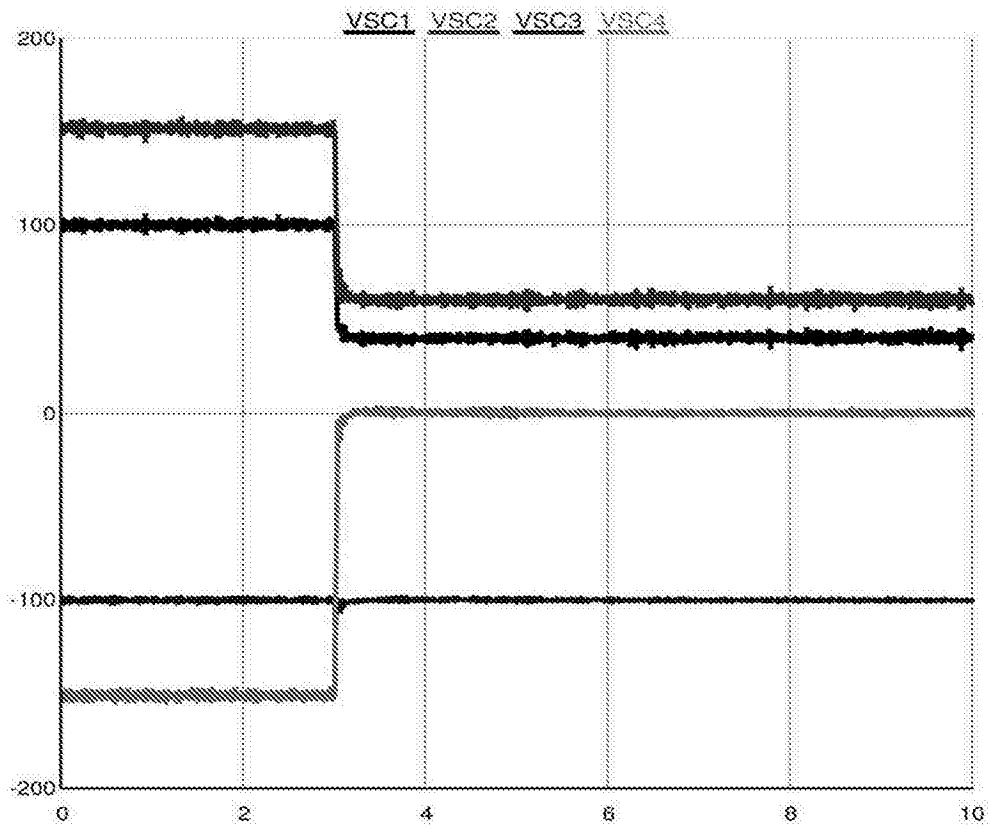


图 8

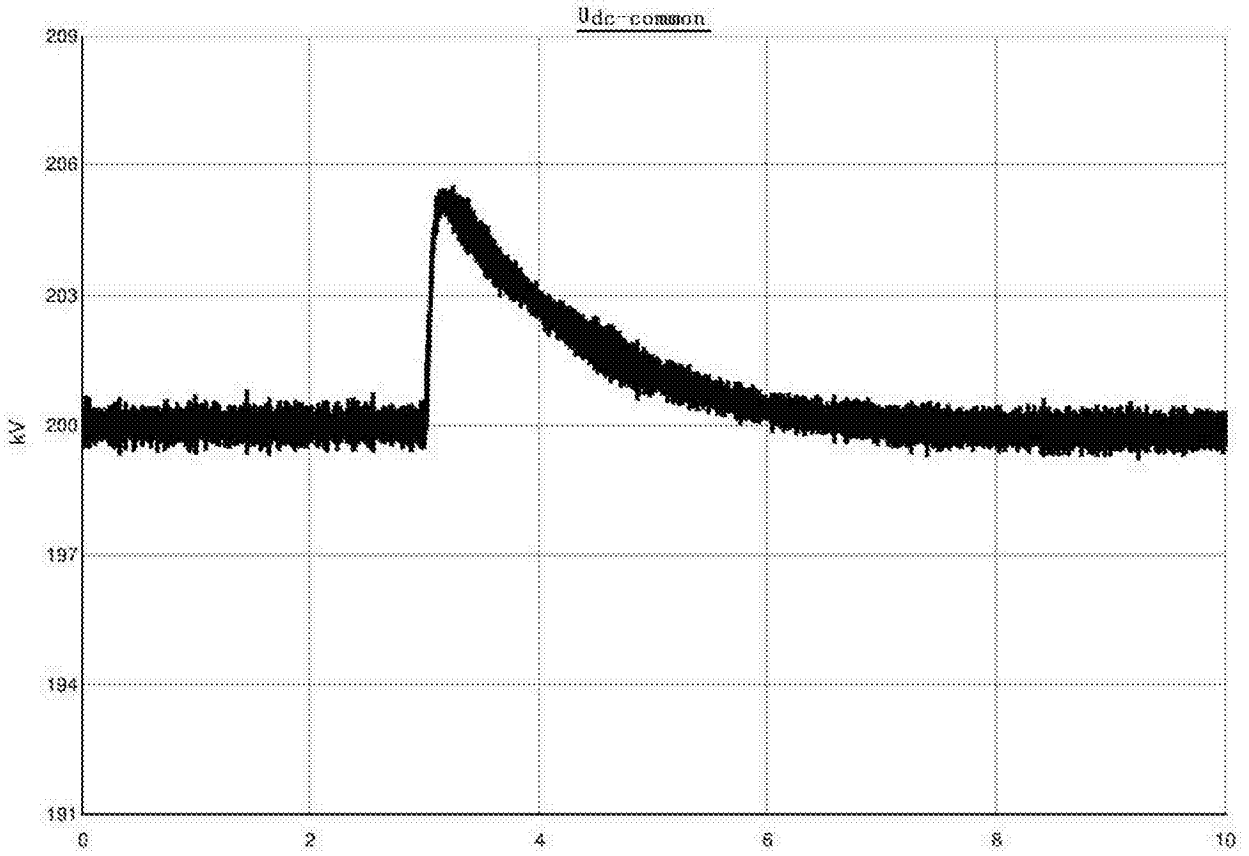


图 9

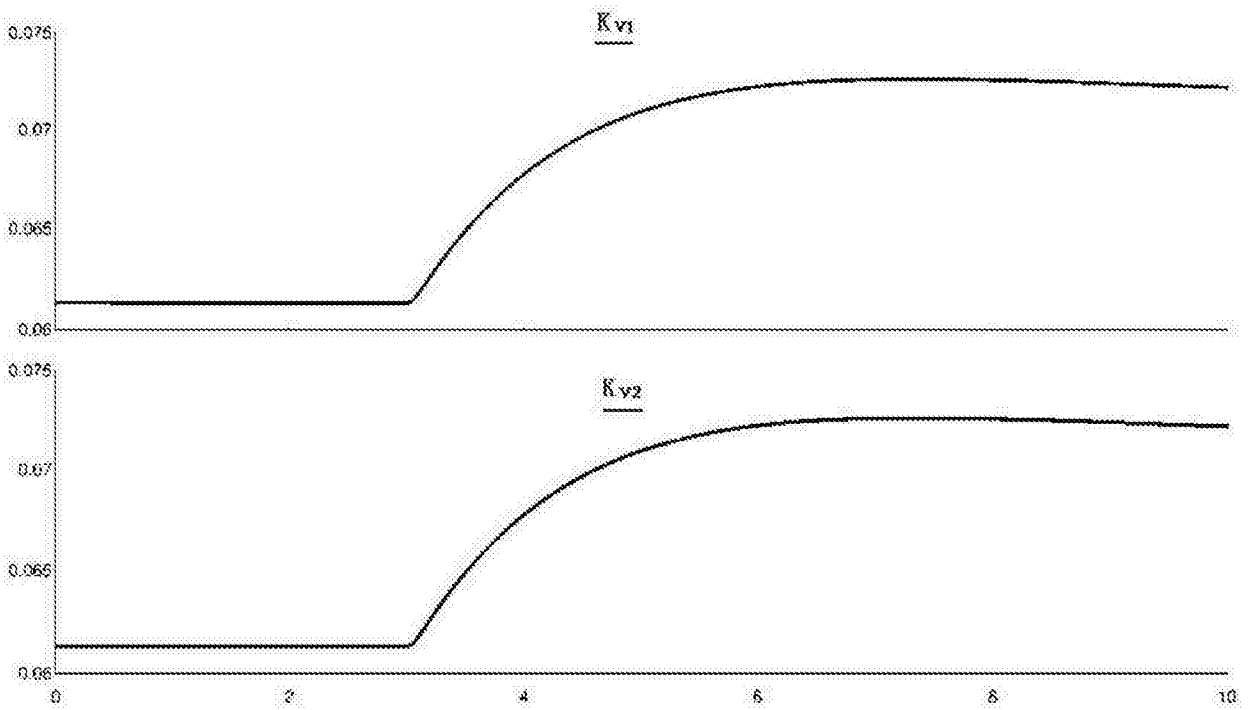


图 10

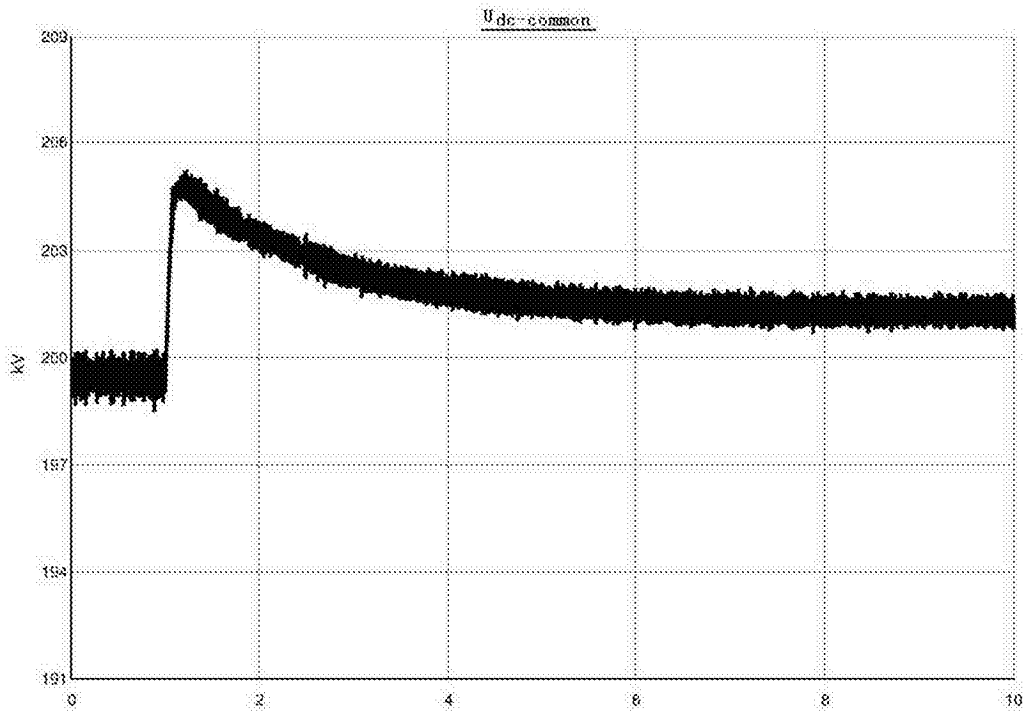


图 11

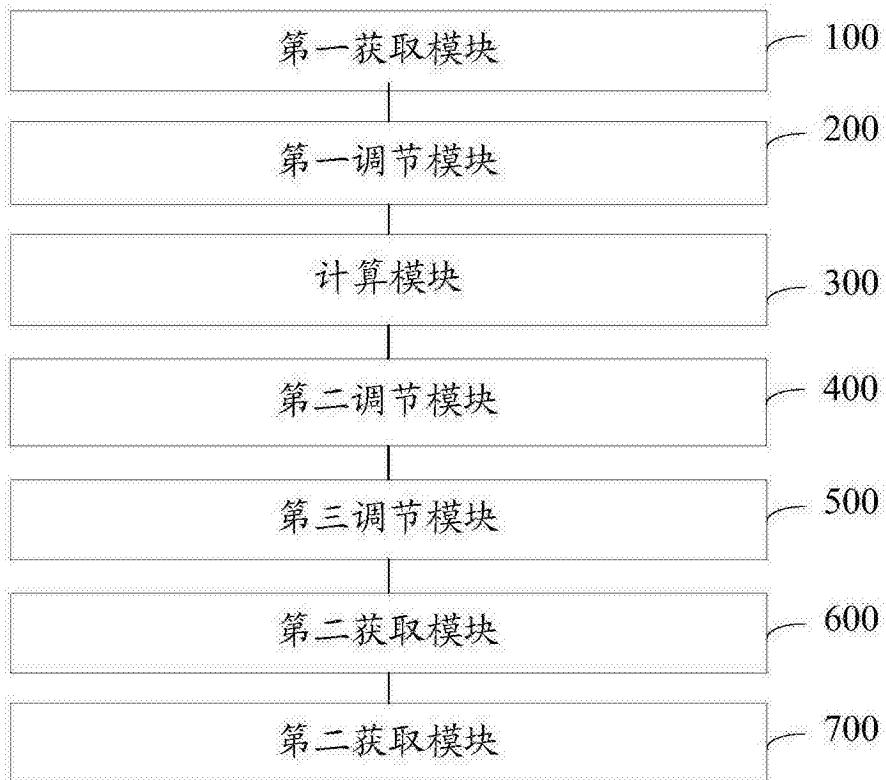


图 12

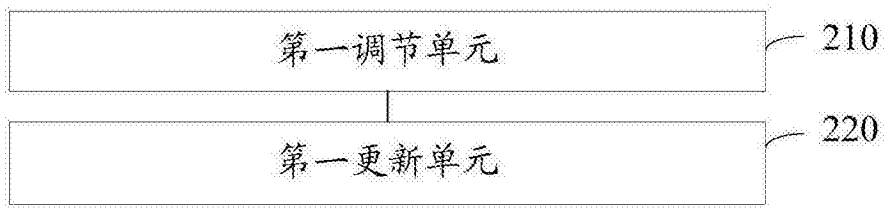


图 13

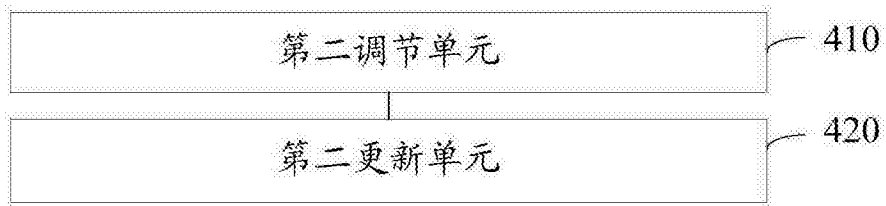


图 14