



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110649642 B

(45) 授权公告日 2021.09.17

(21) 申请号 201911033014.2

(22) 申请日 2019.10.28

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110649642 A

(43) 申请公布日 2020.01.03

(66) 本国优先权数据  
201910931193.5 2019.09.29 CN

(73) 专利权人 山东理工大学  
地址 255086 山东省淄博市高新技术产业  
开发区高创园A座313室

(72) 发明人 彭克 张新慧 赵学深 陈佳佳  
徐丙垠

(74) 专利代理机构 北京聿华联合知识产权代理  
有限公司 11611  
代理人 李哲伟 张文娟

(51) Int.Cl.

H02J 3/32 (2006.01)

H02J 3/36 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 108123467 A, 2018.06.05

US 6803679 B1, 2004.10.12

US 2009218885 A1, 2009.09.03

赵学深 等. 基于前馈补偿的柔性直流配电  
系统下垂控制方法.《电力系统自动化》.2018,第42  
卷(第15期),

孟明 等. 基于最优潮流的交直流配电网分  
层控制策略.《电力建设》.2018,第39卷(第8期),

审查员 邢丹琼

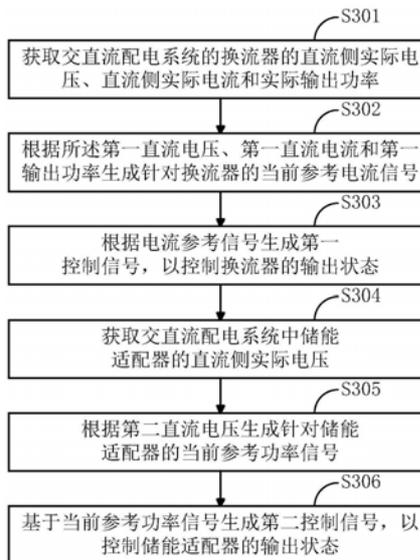
权利要求书2页 说明书9页 附图8页

(54) 发明名称

交直流配电系统电压协调控制方法及交直  
流配电系统

(57) 摘要

一种储能接入的交直流配电系统电压协调  
控制方法,其包括:采用电压-电流下垂控制模  
型,根据第一直流电压和第一直流电流生成针对  
换流器的当前参考电流信号,并根据当前参考电  
流信号生成第一控制信号,以控制换流器的输出  
状态;获取交直流配电系统中储能适配器的直流  
侧实际电压,得到第二直流电压,采用电压-功率  
下垂控制模型,根据第二直流电压生成针对储能  
适配器的当前参考功率信号,基于当前参考功率  
信号生成第二控制信号,以控制储能适配器的输  
出状态。本方法能够根据电压-电流下垂控制特  
性协调各柔性装置均衡出力,充分发挥其调压能  
力,增强直流电压可控性,同时本方法还能够减  
轻电池储能装置调压负担,抑制电池储能装置频  
繁充放电现象,延长电池储能装置使用寿命。



1. 一种储能接入的交直流配电系统电压协调控制方法,其特征在于,所述方法包括:

步骤一、获取交直流配电系统的换流器的直流侧实际电压和直流侧实际电流,得到第一直流电压和第一直流电流;

步骤二、采用电压-电流下垂控制模型,根据所述第一直流电压和第一直流电流生成针对所述换流器的当前参考电流信号,并根据所述当前参考电流信号生成第一控制信号,以控制所述换流器的输出状态;

步骤三、获取交直流配电系统中储能适配器的直流侧实际电压,得到第二直流电压,采用电压-功率下垂控制模型,根据所述第二直流电压生成针对所述储能适配器的当前参考功率信号,基于所述当前参考功率信号生成第二控制信号,以控制所述储能适配器的输出状态;

判断所述第二直流电压是否处于所述储能适配器的预设直流电压允许区间内,如果处于,则将针对与所述储能适配器的预设参考输出功率信号作为所述当前参考功率信号;

如果所述第二直流电压不处于所述储能适配器的预设直流电压允许区间内,则:根据所述第二直流电压和直流微电网适配器的预设参考直流电压信号生成第三电压偏差信号,利用PID控制器根据所述第三电压偏差信号生成输出功率偏差信号,根据所述输出功率偏差信号对所述储能适配器的预设参考输出功率信号进行更新,得到所述当前参考功率信号;

在所述步骤三中的电压-功率下垂控制模型中,存在:

$$P'_{ref} = \begin{cases} (K + \frac{K_i}{s} + K_d s)(U'_{dcref} - U'_{dc}) + P_{ref} & U'_{dc} \leq U_1 \\ P_{ref} & U_1 < U'_{dc} < U_2 \\ (K + \frac{K_i}{s} + K_d s)(U'_{dcref} - U'_{dc}) + P_{ref} & U_2 \leq U'_{dc} \end{cases}$$

其中, $P'_{ref}$ 表示当前参考功率信号, $K$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 分别表示PID控制器的比例系数、积分系数和微分系数, $U'_{dc}$ 表示第二直流电压, $U'_{dcref}$ 表示储能适配器的预设参考直流电压, $P_{ref}$ 表示储能适配器的预设参考输出功率, $U_1$ 和 $U_2$ 分别表示储能适配器的预设直流电压允许区间的最小值和最大值;

通过基于死区控制的电压-功率下垂控制模型利用储能装置进行二次调压,从而实现交直流配电系统电压的有序分层稳定控制,有效改善了交直流配电系统动态及稳态性能。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,采用电压-电流下垂控制模型生成当前参考电流信号的步骤包括:

判断所述第一直流电流是否处于预设换流器输出电流允许区间内,如果处于,则根据所述第一直流电压和第一预设参考电压信号生成第一电压偏差信号;

对所述第一电压偏差信号进行比例变换,得到第二电压偏差信号;

根据所述第二电压偏差信号针对所述换流器的预设参考流信号进行更新,得到所述当前参考电流信号。

3. 如权利要求2所述的方法,其特征在于,

如果所述第一直流电流大于或等于所述预设换流器输出电流允许区间的最大值,则将所述预设换流器输出电流允许区间的最大值作为所述当前参考电流信号;

如果所述第一直流电流小于或等于所述预设换流器输出电流区间的最小值,则将所述预设换流器输出电流允许区间的最小值作为所述当前参考电流信号。

4. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,在所述电压-电流下垂控制模型中,存在:

$$I'_{dc\text{ref}} = \begin{cases} I_{dc\text{min}} & I_{dc} \leq I_{dc\text{min}} \\ I_{dc\text{ref}} + k(U_{dc\text{ref}} - U_{dc}) & I_{dc\text{min}} < I_{dc} < I_{dc\text{max}} \\ I_{dc\text{max}} & I_{dc} \geq I_{dc\text{max}} \end{cases}$$

其中, $I'_{dc\text{ref}}$ 表示当前参考电流信号, $I_{dc\text{max}}$ 和 $I_{dc\text{min}}$ 分别表示预设换流器输出电流允许区间的最大值和最小值, $I_{dc\text{ref}}$ 表示换流器的预设参考流信号, $k$ 表示比例控制器的比例系数, $U_{dc}$ 表示第一直流电压, $I_{dc}$ 表示第一直流电流, $U_{dc\text{ref}}$ 表示第一预设参考电压信号。

5. 如权利要求1~4中任一项所述的方法,其特征在于,所述第二控制信号包括针对所述储能适配器的占空比信号,在所述步骤三中,采用电压外环-电流内环的双闭环控制逻辑,根据所述当前参考功率信号生成针对所述储能适配器的占空比信号。

6. 如权利要求1~5中任一项所述的方法,其特征在于,所述第一控制信号包括针对所述换流器的调制信号,在所述步骤二中,还采用电压外环-电流内环的双闭环控制逻辑,根据所述当前参考电流信号生成换流器的调制信号。

7. 一种交直流配电系统,其特征在于,所述系统包括:

若干换流器,其直流端用于与直流配电网母线连接,交流端用于与交流配电网母线连接;

若干适配器,其一端与所述直流配电网母线连接,另一端用于与功率可调源连接;

交直流配电控制装置,其与所述换流器和适配器连接,用于采用如权利要求1~6中任一项所述方法控制所述换流器和适配器的运行状态。

## 交直流配电系统电压协调控制方法及交直流配电系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及交直流配电技术领域,具体地说,涉及一种储能接入的交直流配电系统电压协调控制方法及交直流配电系统。

### 背景技术

[0002] 随着新能源、新材料、信息技术和电力电子技术的长足发展和广泛应用,用户对用电需求、电能质量及供电可靠性等要求不断提高,现有交流配电系统将面临分布式新能源(电源)接入、负荷和用电需求多样化、潮流均衡协调控制复杂化,以及电能供应稳定性、高效性、经济性等方面的巨大挑战。

[0003] 风电、光伏发电、燃料电池,以及电动汽车动力电池、超级电容器等各种储能装置基本上都是直流电(或采用直流电技术),因此必须通过DC/AC换流器才能并入交流配电系统。同时,众多办公与家用电器设备采用直流供电实际上更为方便、节能。

[0004] 另外,由于城市规划与电力系统规划工作的相互分离,现阶段城市发展形成了与负荷发展要求不相适应的配电系统结构,这使得配电系统的规划、发展及供电质量越来越不适应城市发展的需求。

[0005] 总之,传统的配电系统结构与配(供)电方式已越来越不能满足快速发展的经济社会对其提出的更加环保、更加安全可靠、更加优质经济、支持分布式电源接入以及用户与电网双向互动等诸多要求。

[0006] 基于直流的配电系统在输送容量、可控性及提高供电质量等方面具有比交流更好的性能,可以有效提高电能质量、减少电力电子换流器的使用、降低电能损耗和运行成本、协调大电网与分布式电源之间的矛盾,进而充分发挥分布式能源的价值和效益。

[0007] 光伏发电和风力发电等分布式电源功率输出的随机频繁波动、电动汽车的随机充电需求以及电力负荷的频繁投切,都使得柔性直流配电系统功率不平衡现象频发,这样也就给柔性直流配电系统安全稳定运行带来巨大挑战,同时也对交流配电系统造成较大影响。

### 发明内容

[0008] 为解决上述问题,本发明提供了一种储能接入的交直流配电系统电压协调控制方法,所述方法包括:

[0009] 步骤一、获取交直流配电系统的换流器的直流侧实际电压和直流侧实际电流,得到第一直流电压和第一直流电流;

[0010] 步骤二、采用电压-电流下垂控制模型,根据所述第一直流电压和第一直流电流生成针对所述换流器的当前参考电流信号,并根据所述当前参考电流信号生成第一控制信号,以控制所述换流器的输出状态;

[0011] 步骤三、获取交直流配电系统中储能适配器的直流侧实际电压,得到第二直流电压,采用电压-功率下垂控制模型,根据所述第二直流电压生成针对所述储能适配器的当前

参考功率信号,基于所述当前参考功率信号生成第二控制信号,以控制所述储能适配器的输出状态。

[0012] 根据本发明的一个实施例,采用电压-电流下垂控制模型生成参考电流信号的步骤包括:

[0013] 判断所述第一直流电流是否处于预设换流器输出电流允许区间内,如果处于,则根据所述第一直流电压和第一预设参考电压信号生成第一电压偏差信号;

[0014] 对所述第一电压偏差信号进行比例变换,得到第二电压偏差信号;

[0015] 根据所述第二偏差信号针对所述换流器的预设参考流信号进行更新,得到所述当前参考电流信号。

[0016] 根据本发明的一个实施例,如果所述第一直流电流大于或等于所述预设换流器输出电流允许区间的最大值,则将所述预设换流器输出电流允许区间的最大值作为所述当前参考电流信号;

[0017] 如果所述第一直流电流小于或等于所述预设换流器输出电流区间的最小值,则将所述预设换流器输出电流允许区间的最小值作为所述当前参考电流信号。

[0018] 根据本发明的一个实施例,在所述电压-电流下垂控制模型中,存在:

$$[0019] \quad I'_{dcref} = \begin{cases} I_{dcmin} & I_{dc} \leq I_{dcmin} \\ I_{dcref} + k(U_{dcref} - U_{dc}) & I_{dcmin} < I_{dc} < I_{dcmax} \\ I_{dcmax} & I_{dc} \geq I_{dcmax} \end{cases}$$

[0020] 其中, $I'_{dcref}$ 表示当前参考电流信号, $I_{dcmax}$ 和 $I_{dcmin}$ 分别表示预设换流器输出电流允许区间的最大值和最小值, $I_{dcref}$ 表示换流器的预设参考流信号, $k$ 表示比例控制器的比例系数, $U_{dc}$ 表示第一直流电压, $I_{dc}$ 表示第一直流电流, $U_{dcref}$ 表示第一预设参考电压信号。

[0021] 根据本发明的一个实施例,在所述步骤三中,采用电压-功率下垂控制模型生成当前参考功率信号的步骤包括:

[0022] 判断所述第二直流电压是否处于所述储能适配器的预设直流电压允许区间内,如果处于,则将针对与所述储能适配器的预设参考输出功率信号作为所述当前参考功率信号。

[0023] 根据本发明的一个实施例,如果所述第二直流电压不处于所述储能适配器的预设直流电压允许区间内,则:

[0024] 根据所述第二直流电压和所述直流微电网适配器的预设参考直流电压信号生成第三电压偏差信号;

[0025] 利用PID控制器根据所述第三电压偏差信号生成输出功率偏差信号;

[0026] 根据所述输出功率偏差信号对所述储能适配器的预设参考输出功率信号进行更新,得到所述当前参考功率信号。

[0027] 根据本发明的一个实施例,在所述步骤电压-功率下垂控制模型中,存在:

$$[0028] \quad P'_{ref} = \begin{cases} (K + \frac{K_i}{s} + K_d s)(U'_{dcref} - U'_{dc}) + P_{ref} & U'_{dc} \leq U_1 \\ P_{ref} & U_1 < U'_{dc} < U_2 \\ (K + \frac{K_i}{s} + K_d s)(U'_{dcref} - U'_{dc}) + P_{ref} & U_2 \leq U'_{dc} \end{cases}$$

[0029] 其中,  $P'_{ref}$  表示当前参考功率信号,  $K$ 、 $K_i$  和  $K_d$  分别表示PID控制器的比例系数、积分系数和微分系数,  $U'_{dc}$  表示第二直流电压,  $U'_{dcref}$  表示储能适配器的预设参考直流电压,  $P_{ref}$  表示储能适配器的预设参考输出功率,  $U_1$  和  $U_2$  分别表示储能适配器的预设直流电压允许区间的最小值和最大值。

[0030] 根据本发明的一个实施例, 所述第二控制信号包括针对所述储能适配器的占空比信号, 在所述步骤三中, 采用电压外环-电流内环的双闭环控制逻辑, 根据所述当前参考功率信号生成针对所述储能适配器的占空比信号。

[0031] 根据本发明的一个实施例, 在所述步骤三中, 还采用电压外环-电流内环的双闭环控制逻辑, 根据所述当前参考功率信号生成换流器的调制信号。

[0032] 本发明还提供了一种交直流配电系统, 所述系统包括:

[0033] 若干换流器, 其直流端用于与直流配电网母线连接, 交流端用于与交流配电网母线连接;

[0034] 若干适配器, 其一端与所述直流配电网母线连接, 另一端用于与功率可调源连接;

[0035] 交直流配电控制装置, 其与所述换流器和适配器连接, 用于采用如上任一项所述方法控制所述换流器和适配器的运行状态。本发明提供的储能接入的交直流配电系统的交直流配电方法为基于分层控制策略的控制方法, 其分为一次调压和二次调压。其中, 一次调压由电压-电流下垂控制模式下柔性装置承担, 以实现以下目的: 1) 根据电压-电流下垂控制特性协调各柔性装置均衡出力, 充分发挥其调压能力, 增强直流电压可控性; 2) 减轻电池储能装置调压负担, 抑制电池储能装置频繁充放电现象, 延长电池储能装置使用寿命。

[0036] 通过分析发现, 一次调压虽然能够实时响应, 但当直流配电系统功率不平衡现象比较严重时, 各柔性装置出力不足以满足系统功率需求, 且致使直流电压波动较大。此时, 就需要利用电池储能装置对系统进行二次调压, 以补偿柔性直流配电功率不平衡量, 将直流电压调节至允许范围。

[0037] 具体地, 本实施例中, 二次调压由电压-功率下垂控制模式下电池储能装置完成。二次调压能够较好地满足柔性直流配电系统功率需求, 使得二次调压后直流电压能够恢复至稳定工作区。同时, 二次调压还能够增强系统阻尼, 加快系统动态调节速度, 提高系统稳定性。此外, 二次调压还能够减小扰动前后交直流配电系统交换功率变化量, 即减小柔性直流配电系统接入对交流配电系统的影响。

[0038] 本发明的其它特征和优点将在随后的说明书中阐述, 并且, 部分地从说明书中变得显而易见, 或者通过实施本发明而了解。本发明的目的和其他优点可通过在说明书、权利要求书以及附图中所特别指出的结构来实现和获得。

## 附图说明

[0039] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案, 下面将对实施例或现

有技术描述中所需要的附图做简单的介绍：

- [0040] 图1是根据本发明一个实施例的交直流配电系统多端供电结构示意图；
- [0041] 图2是根据本发明一个实施例的交直流配电系统的结构示意图；
- [0042] 图3是根据本发明一个实施例的交直流配电方法的实现流程示意图；
- [0043] 图4是根据本发明一个实施例的生成当前参考电流信号的实现流程示意图；
- [0044] 图5是根据本发明一个实施例的电压-功率下垂控制模型的逻辑示意图；
- [0045] 图6是根据本发明一个实施例的电压-电流下垂控制模型的下垂曲线示意图；
- [0046] 图7是根据本发明一个实施例的无功功率控制的逻辑示意图；
- [0047] 图8和图9是现有的基于死区控制的电压-功率下垂控制原理图及控制框图；
- [0048] 图10是根据本发明一个实施例的采用电压-功率下垂控制模型生成当前参考功率信号的实现流程示意图；
- [0049] 图11是根据本发明一个实施例的采用电压-功率下垂控制模型生成当前参考功率信号的逻辑示意图；
- [0050] 图12是根据本发明一个实施例的改进后的IEEE33节点配电系统模型
- [0051] 图13至16是根据本发明一个实施例的仿真结果示意图。

### 具体实施方式

[0052] 以下将结合附图及实施例来详细说明本发明的实施方式,借此对本发明如何应用技术手段来解决技术问题,并达成技术效果的实现过程能充分理解并据以实施。需要说明的是,只要不构成冲突,本发明中的各个实施例以及各实施例中的各个特征可以相互结合,所形成的技术方案均在本发明的保护范围之内。

[0053] 同时,在以下说明中,出于解释的目的而阐述了许多具体细节,以提供对本发明实施例的彻底理解。然而,对本领域的技术人员来说显而易见的是,本发明可以不用这里的具体细节或者所描述的特定方式来实施。

[0054] 另外,在附图的流程图示出的步骤可以在诸如一组计算机可执行指令的计算机系统中执行,并且,虽然在流程图中示出了逻辑顺序,但是在某些情况下,可以以不同于此处的顺序执行所示出或描述的步骤。

[0055] 柔性直流配电系统通过柔性装置实现与交流配电系统互联,主要采用主从控制和对等控制来实现其稳定运行。主从控制方式虽然能够实现柔性直流配电系统电压的无差调节,但主柔性装置需配置较大容量,且主柔性装置输出功率的随机频繁变化给交流配电系统安全稳定运行产生较大负面影响。下垂控制是对等控制的一种典型应用模式,能够协调各柔性装置功率输出,抑制因系统功率不平衡而造成的直流电压波动。然而,现有的下垂控制方式存在直流电压波动大且系统阻尼弱等缺点,为此需要配备储能装置补偿直流配电系统功率不平衡量。

[0056] 柔性直流配电系统功率不平衡现象频发,给其安全稳定运行带来了巨大挑战。为解决柔性直流配电系统电压稳定性差且控制困难等问题,和减少柔性直流配电系统接入对交流配电系统的影响,并抑制直流线路参数、交流互联电网强度以及外环控制参数变化时造成的系统不稳定现象,本发明提供了一种交直流配电方法以及应用该方法进行交直流配电控制的交直流配电系统,该方法作为一种储能接入的交直流配电系统电压协调控制方

法,其在采用柔性装置下垂控制进行一次调压的基础上,通过基于死区控制的储能装置进行二次调压,实现了交直流配电系统电压的有序分层稳定控制,有效改善了交直流配电系统动态及稳态性能。

[0057] 图1给出了交直流配电系统多端供电结构示意图。该供电结构存在以下优点:1)改变了传统交流配电系统网络结构,实现了交流系统间的不同步分区互联,提升了供电能力和供电可靠性;2)配电传输容量大、可靠性高和可控性强的优势,适合对交流配电系统增容受限的负荷中心实现供电;3)直流配电系统灵活的控制运行方式和网络结构,在多种能源互补发电和柔性负荷兼容性等方面均表现出突出的优势;4)有功无功独立解耦运行,增强了系统潮流控制能力,并可对交流配电系统进行无功支撑,提高其故障穿越能力。

[0058] 图2示出了本实施例所提供的交直流配电系统的结构示意图,图3示出了本实施例所提供的交直流配电方法的实现流程示意图。以下结合图2和图3来该交直流配电方法实现其功能的原理以及过程进行进一步地说明。

[0059] 如图2所示,本实施例所提供的交直流配电系统优选地包括:若干换流器、若干适配器以及交直流配电控制装置201。其中,换流器(例如第一换流器203a、第二换流器203b以及第三换流器203c等)的直流端用于与直流配电网母线202连接,其交流端则用于与交流母线连接。

[0060] 适配器的一端与直流配电网母线202连接,其另一端则用于与功率可调源连接。例如,如图2所示,第一适配器203a用于将光伏发电装置与直流配电网母线202连接,其所实现的是DC/DC电压转换;第二适配器203b用于将交流负荷与直流配电网母线202连接,其所实现的是AC/DC电压转换;第三适配器203c用于将储能装置与直流配电网母线202连接,其所实现的是DC/DC电压转换。

[0061] 需要指出的是,在本发明的不同该实施例中,交直流配电系统中所包含的换流器和/或适配器的数量可以根据实际需要进行合理配置,本发明并不对此进行具体限定。

[0062] 交直流配电控制装置201与换流器和适配器连接,其能够采用本发明所提供的交直流配电方法来控制换流器和适配器的运行状态。具体地,交直流配电控制装置201能够通过通过对换流器进行控制以实现一次调压的基础上,通过基于死区控制的储能装置进行二次调压,来实现交直流配电系统电压的有序分层稳定控制

[0063] 具体地,如图3所示,本实施例中,该交直流配电方法优选的会在步骤S301中获取交直流配电系统的换流器的直流侧实际电压和直流侧实际电流,从而得到第一直流电压和第一直流电流。

[0064] 随后,该方法会在步骤S302中采用电压-电流下垂控制模型,根据步骤S301中所得到的上述第一直流电压和第一直流电流生成针对换流器的当前参考电流信号。

[0065] 然后,该方法会在步骤S303中根据所述当前参考电流信号生成第一控制信号,以控制所述换流器的输出状态。

[0066] 具体地,如图4所示,本实施例中,该方法在当前生成参考电流信号时,优选地会在步骤S401中判断上述第一直流电流是否处于预设换流器输出电流允许区间内。如果上述第一直流电流处于预设换流器输出电流允许区间,那么该方法则会在步骤S402中根据第一直流电压和第一预设参考电压信号生成第一电压偏差信号。在得到第一电压偏差信号后,该方法优选地会在步骤S403中来对上述第一电压偏差信号进行比例变换,从而得到第二电压

偏差信号。最后,该方法会在步骤S404中根据步骤S403中所得到的上述第二偏差信号针对换流器的预设参考流信号进行更新,从而得到当前参考电流信号。

[0067] 参照图5所示,本实施例中,如果上述第一直流电流 $I_{dc}$ 处于预设换流器输出电流允许区间 $[I_{dcmin}, I_{dcmax}]$ 内(即 $I_{dcmin} < I_{dc} < I_{dcmax}$ ),那么该方法可以利用第一减法器501来计算第一预设参考电压信号 $U_{dcref}$ 与第一直流电压 $U_{dc}$ 的差值,从而得到第一电压偏差信号 $\Delta U_{dc}$ 。即存在:

$$[0068] \quad \Delta U_{dc} = U_{dcref} - U_{dc} \quad (1)$$

[0069] 在得到第一电压偏差信号 $\Delta U_{dc}$ 后,该方法可以利用第一比例控制器来对上述第一电压偏差信号 $\Delta U_{dc}$ 进行比例变换,从而得到第二电压偏差信号。随后,该方法可以利用第一加法器来根据上述第二偏差信号和针对换流器的预设参考流信号 $I_{dcref}$ 进行更新,从而得到当前参考电流信号 $I'_{dcref}$ 。即存在:

$$[0070] \quad I'_{dcref} = I_{dcref} + k(U_{dcref} - U_{dc}) \quad (2)$$

[0071] 在得到当前参考电流信号 $I'_{dcref}$ 后,该方法也就可以通过后续的电流闭环控制来生成相应的第一控制信号,以控制换流器的输出状态。

[0072] 本实施例中,如果第一直流电流 $I_{dc}$ 大于或等于预设换流器输出电流允许区间的最大值 $I_{dcmax}$ (即 $I_{dc} \geq I_{dcmax}$ ),该方法优选地会将预设换流器输出电流允许区间的最大值 $I_{dcmax}$ 作为当前参考电流信号 $I'_{dcref}$ 。即存在:

$$[0073] \quad I'_{dcref} = I_{dcmax} \quad (3)$$

[0074] 而如果上述第一直流电流 $I_{dc}$ 小于或等于所述预设换流器输出电流区间的最小值 $I_{dcmin}$ (即 $I_{dc} \leq I_{dcmin}$ ),该方法优选的会将预设换流器输出电流允许区间的最小值 $I_{dcmin}$ 作为所述当前参考电流信号 $I'_{dcref}$ 。即存在:

$$[0075] \quad I'_{dcref} = I_{dcmin} \quad (4)$$

[0076] 这样,电压-电流下垂控制模型中,也就存在:

$$[0077] \quad I'_{dcref} = \begin{cases} I_{dcmin} & I_{dc} \leq I_{dcmin} \\ I_{dcref} + k(U_{dcref} - U_{dc}) & I_{dcmin} < I_{dc} < I_{dcmax} \\ I_{dcmax} & I_{dc} \geq I_{dcmax} \end{cases} \quad (5)$$

[0078] 其中, $I'_{dcref}$ 表示当前参考电流信号, $I_{dcmax}$ 和 $I_{dcmin}$ 分别表示预设换流器输出电流允许区间的最大值和最小值, $I_{dcref}$ 表示换流器的预设参考流信号, $k$ 表示比例控制器的比例系数, $U_{dc}$ 表示第一直流电压, $U_{dcref}$ 表示第一预设参考电压信号, $I_{dc}$ 表示第一直流电流。图6示出了本实施例中电压-电流下垂控制模型的下垂曲线示意图。

[0079] 需要指出的是,本实施例中,采用上述电压-电流下垂控制模型,该方法还可以实现对换流器输出无功功率的控制。具体地,如图7所示,本实施例中,该方法还可以获取到换流器交流测的无功功率 $Q$ ,并利用第二减法器701计算无功功率 $Q$ 与参考无功功率信号 $Q_{ref}$ 之间的差值,从而得到无功功率偏差信号 $\Delta Q$ 。基于该无功功率偏差信号 $\Delta Q$ ,该方法可以利用相应的闭环控制来生成控制信号,以控制换流器的运行状态。

[0080] 当然,在本发明的其他实施例中,该方法所采用的电压-电流下垂控制模型还可以为其他合理模型,本发明并不对此进行具体限定。

[0081] 图8和图9分别给出了交直流配电系统中电池储能通常采用基于死区控制的电压-功率下垂控制原理图及控制框图。对于现有的电压-功率下垂控制模型来说,其会利用加法

器来计算直流微电网适配器的直流侧实际电压 $U_{dc}$ 与其预设参考直流电压信号 $U_{dc\text{ref}}$ 之间的差值,并利用比例控制器对该差值信号进行处理后与预设参考输出功率信号进行求和来得到新的参考输出功率信号,继而通过闭环控制的方式来基于新的参考输出功率信号生成相应的控制信号。

[0082] 具体地,对于现有的电压-功率下垂控制模型来说,存在:

$$[0083] \quad P = \begin{cases} K(U_{dc\text{ref}} - U_{dc}) + P_{\text{ref}} & U_{dc} \leq U_1 \\ P_{\text{ref}} & U_1 < U_{dc} < U_2 \\ K(U_{dc\text{ref}} - U_{dc}) + P_{\text{ref}} & U_2 \leq U_{dc} \end{cases} \quad (6)$$

[0084] 其中,K表示直流电压下垂系数。

[0085] 为解决柔性直流配电系统电压稳定性差且控制困难等问题,减少柔性直流配电系统接入对交流配电系统的影响,并抑制直流线路参数、交流互联电网强度以及外环控制参数变化时造成的系统不稳定现象,本方法提供了一种新的电压-功率下垂控制模型,以通过基于死区控制的下垂控制模型利用储能装置进行二次调压,从而实现交直流配电系统电压的有序分层稳定控制,有效改善了交直流配电系统动态及稳态性能。

[0086] 需要指出的是,本实施例中,第一控制信号优选地包括针对所述换流器的调制信号,优选地还可以采用电压外环-电流内环的双闭环控制逻辑,来根据当前参考电流信号生成针对换流器的调制信号。

[0087] 图10示出了本实施例中采用电压-功率下垂控制模型生成当前参考功率信号的实现流程示意图。

[0088] 如图10所示,本实施例中,该方法会在步骤S1001中获取交直流配电系统中储能适配器的直流侧实际电压,得到第二直流电压 $U'_{dc}$ 。随后,该方法会在步骤S1002中判断上述第二直流电压 $U'_{dc}$ 是否处于储能适配器的预设直流电压允许区间内。

[0089] 其中,如果上述第二直流电压 $U'_{dc}$ 处于储能适配器的预设直流电压允许区间 $[U_1, U_2]$ 内(即 $U_1 < U'_{dc} < U_2$ ),该方法则会在步骤S1006中将针对与储能适配器的预设参考输出功率信号作为当前参考功率信号。即,存在:

$$[0090] \quad P'_{\text{ref}} = P_{\text{ref}} \quad (7)$$

[0091] 其中, $P'_{\text{ref}}$ 表示当前参考功率信号, $P_{\text{ref}}$ 表示储能适配器的预设参考输出功率信号。

[0092] 而如果上述第二直流电压 $U'_{dc}$ 不处于所述储能适配器的预设直流电压区间 $[U_1, U_2]$ 内,该方法则优选地会在步骤S1003中根据上述第二直流电压 $U'_{dc}$ 和储能适配器的预设参考直流电压信号 $U'_{dc\text{ref}}$ 生成第三电压偏差信号。随后,该方法优选地会在步骤S1004中利用PID控制器根据上述第三电压偏差信号生成相应的输出功率偏差信号,最后在步骤S1005中根据步骤S1004中所得到的输出功率偏差信号对直流微电网适配器的预设参考输出功率信号 $P_{\text{ref}}$ 进行更新,这样也就得到了当前参考功率信号 $P'_{\text{ref}}$ 。

[0093] 图11示出了本实施例中采用电压-功率下垂控制模型生成当前参考功率信号的逻辑示意图。

[0094] 如图11所示,本实施例中,该方法可以利用第三减法器1101来计算第二直流电压 $U'_{dc}$ 和储能适配器的预设参考直流电压信号 $U'_{dc\text{ref}}$ 的差值,从而生成第三电压偏差信号 $\Delta U_{dc}$ 。即存在:

$$[0095] \quad \Delta U_{dc} = U'_{dc\text{ref}} - U'_{dc} \quad (8)$$

[0096] 随后,该方法可以利用逻辑模块1102和PID控制模块1103来根据上述第三电压偏差信号 $\Delta U_{dc}$ 生成输出功率偏差信号,并将该输出功率偏差信号传输至第二加法器1104,由第二加法器1104来通过对输出功率偏差信号和直流微电网适配器的预设参考输出功率信号 $P_{ref}$ 进行求和计算,从而得到所需要的当前参考功率信号 $P'_{ref}$ 。

[0097] 本实施例中,如果上述第二直流电压 $U'_{dc}$ 处于储能适配器的预设直流电压允许区间 $[U_1, U_2]$ 内,那么逻辑模块1102所输出的信号则为零;而如果上述第二直流电压 $U'_{dc}$ 不处于储能适配器的预设直流电压允许区间 $[U_1, U_2]$ 内,那么逻辑模块1102所输出的信号则为其输入信号(即第三电压偏差信号 $\Delta U_{dc}$ )。

[0098] 本实施例中,PID控制模块1103的传递函数可以表示为:

$$[0099] \quad G(s) = K + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (9)$$

[0100] 这样,对于本实施例所提供的电压-功率下垂控制模型来说,也就存在:

$$[0101] \quad P'_{ref} = \begin{cases} (K + \frac{K_i}{s} + K_d s)(U'_{dc\text{ref}} - U'_{dc}) + P_{ref} & U'_{dc} \leq U_1 \\ P_{ref} & U_1 < U'_{dc} < U_2 \\ (K + \frac{K_i}{s} + K_d s)(U'_{dc\text{ref}} - U'_{dc}) + P_{ref} & U_2 \leq U'_{dc} \end{cases} \quad (10)$$

[0102] 其中, $P'_{ref}$ 表示当前参考功率信号, $K$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 分别表示PID控制器的比例系数、积分系数和微分系数, $U'_{dc}$ 表示第二直流电压, $U'_{dc\text{ref}}$ 表示储能适配器的预设参考直流电压, $P_{ref}$ 表示储能适配器的预设参考输出功率, $U_1$ 和 $U_2$ 分别表示储能适配器的预设直流电压区间的最小值和最大值。

[0103] 在得到当前参考功率信号 $P'_{ref}$ ,该方法可以采用采用电压外环-电流内环的双闭环控制逻辑来根据当前参考功率信号生成第二控制信号。本实施例中,上述第二控制信号优选地包括针对所述储能适配器的占空比信号,该方法优选地采用电压外环-电流内环的双闭环控制逻辑,根据当前参考功率信号生成针对储能适配器的占空比信号。由于双闭环控制模型较为成熟,因此在此不再对该部分内容进行赘述。

[0104] 本实施例中,该方法采用电压-功率下垂控制模型对储能适配器进行控制时,优选地会控制储能装置的输出功率。即上述储能适配器为针对于交直流配电系统中储能装置的适配器。

[0105] 图12给出了在仿真软件上搭建的改进后的IEEE33节点配电系统模型。其中,直流配电系统集成光伏发电装置、电池储能装置以及交直流负载等,直流电压等级为20kV;光伏发电装置额定容量为2MW,实际发出有功功率均为1.8MW;电池储能装置容量为2MWh;直流负荷功率均为0.5MW。仿真工况:直流负载在1s时增加40%,仿真在12s时结束。

[0106] 由图13可知,传统电压协调控制方法下的电池储能装置输出有功功率调节相对较小,即不能充分发挥其功率调节能力。而本发明所提供的新型提高柔性直流配电系统动态及稳态性能的交流配电方法下的电池储能装置输出有功功率调节相对较大,即能充分发挥其功率调节能力。

[0107] 由图14可知,传统电压协调控制方法下的系统的动态调节过程相对较长,即系统

阻尼较弱,在暂态调节过程结束后,稳态直流电压偏离设定值很远,即直流配电系统的功率不平衡没有得到有效的抑制。而本发明提供的新型提高柔性直流配电系统动态及稳态性能的交流配电方法下的系统的动态调节过程相对较段,即系统阻尼较强,在暂态调节过程结束后,稳态直流电压接近设定值,即有效地抑制了直流配电系统的功率不平衡现象。

[0108] 由图15可知,传统电压协调控制方法下的某变流器的工作点发生了很大的变化,即交直流系统之间的瞬时交换功率发生了很大的变化。而本发明提供的新型提高柔性直流配电系统动态及稳态性能的交流配电方法下的某变流器的工作点变化较小,即交直流间交换功率的瞬时变化较小。

[0109] 由图16可知,传统电压协调控制方法下的交流系统的电压水平变化相对较大。而本发明提供的储能接入的交直流配电系统电压协调控制方法下的交流系统电压水平变化相对较小。

[0110] 从上述描述中可以看出,本发明提供的储能接入的交直流配电系统的交直流配电方法为基于分层控制策略的控制方法,其分为一次调压和二次调压。其中,一次调压由电压-电流下垂控制模式下柔性装置承担,以实现以下目的:1)根据电压-电流下垂控制特性协调各柔性装置均衡出力,充分发挥其调压能力,增强直流电压可控性;②减轻电池储能装置调压负担,抑制电池储能装置频繁充放电现象,延长电池储能装置使用寿命。

[0111] 通过分析发现,一次调压虽然能够实时响应,但当直流配电系统功率不平衡现象比较严重时,各柔性装置出力不足以满足系统功率需求,且致使直流电压波动较大。此时,就需要利用电池储能装置对系统进行二次调压,以补偿柔性直流配电功率不平衡量,将直流电压调节至允许范围。

[0112] 具体地,本实施例中,二次调压由电压-功率下垂控制模式下电池储能装置完成。二次调压能够较好地满足柔性直流配电系统功率需求,使得二次调压后直流电压能够恢复至稳定工作区。同时,二次调压还能够增强系统阻尼,加快系统动态调节速度,提高系统稳定性。此外,二次调压还能够减小扰动前后交直流配电系统交换功率变化量,即减小柔性直流配电系统接入对交流配电系统的影响。

[0113] 应该理解的是,本发明所公开的实施例不限于这里所公开的特定结构或处理步骤,而应当延伸到相关领域的普通技术人员所理解的这些特征的等同替代。还应当理解的是,在此使用的术语仅用于描述特定实施例的目的,而并不意味着限制。

[0114] 说明书中提到的“一个实施例”或“实施例”意指结合实施例描述的特定特征、结构或特性包括在本发明的至少一个实施例中。因此,说明书通篇各个地方出现的短语“一个实施例”或“实施例”并不一定均指同一个实施例。

[0115] 虽然上述示例用于说明本发明在一个或多个应用中的原理,但对于本领域的技术人员来说,在不背离本发明的原理和思想的情况下,明显可以在形式上、用法及实施的细节上作各种修改而不用付出创造性劳动。因此,本发明由所附的权利要求书来限定。

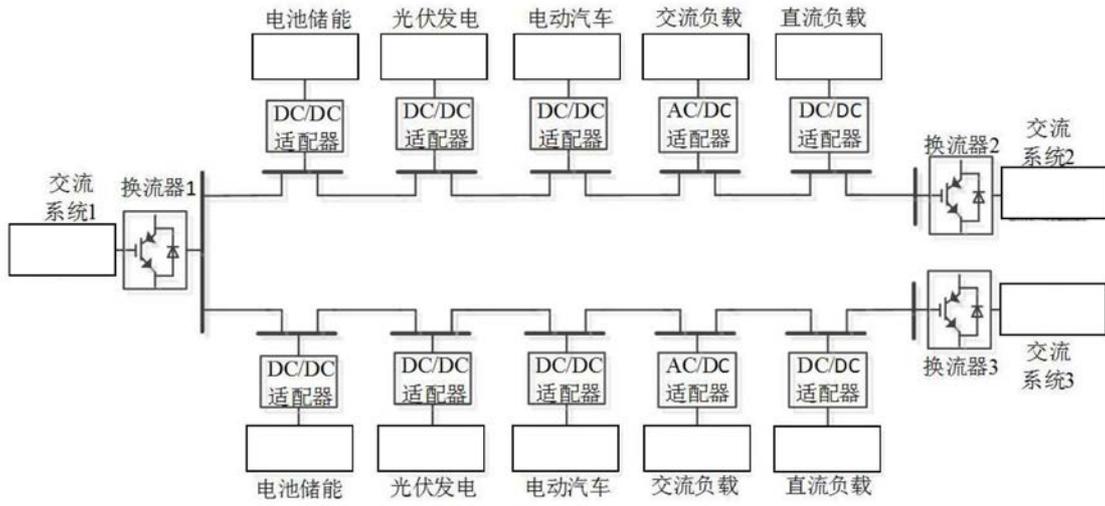


图1

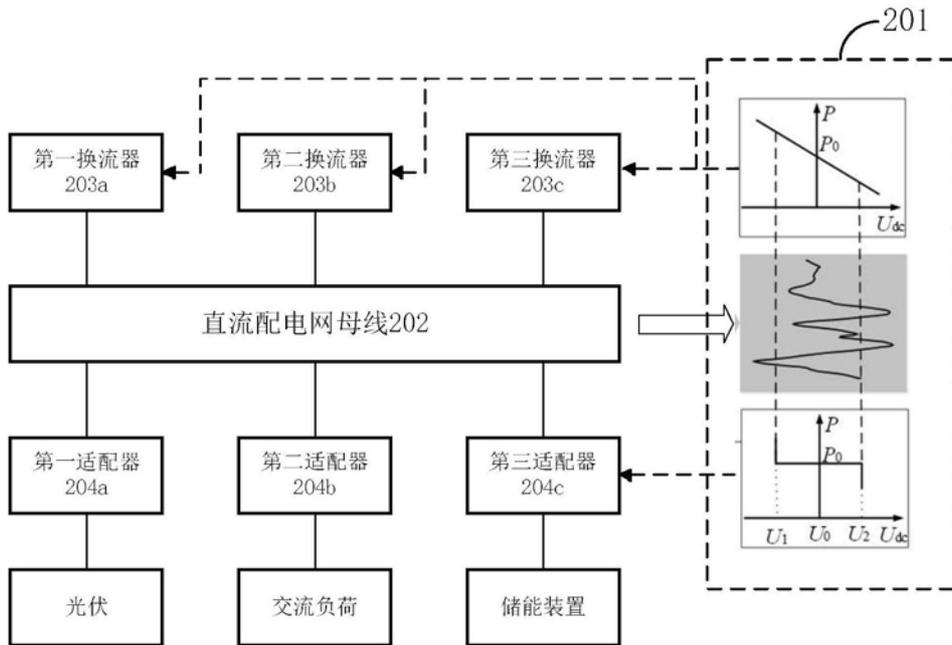


图2

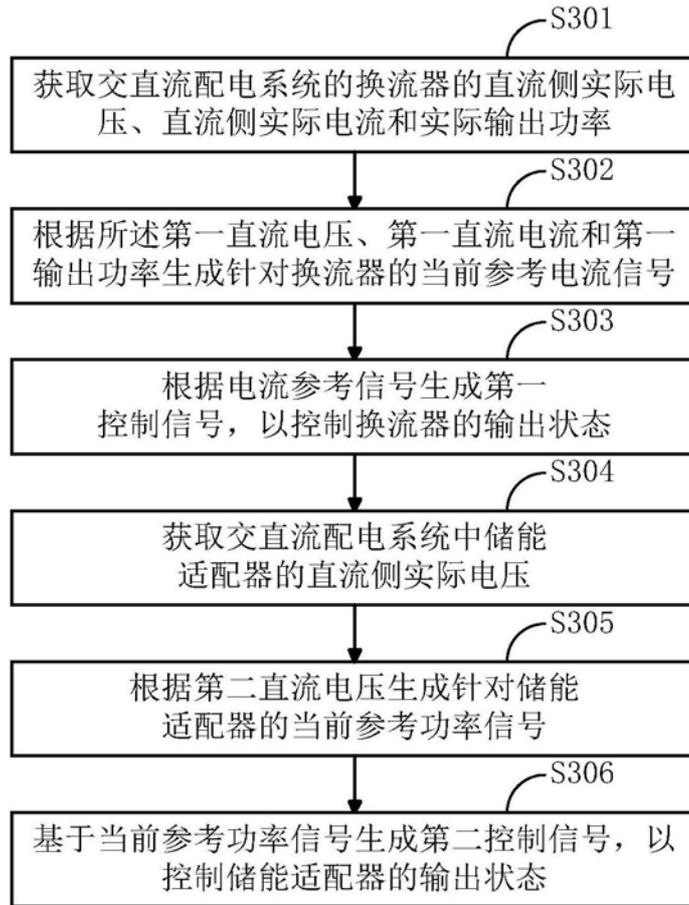


图3

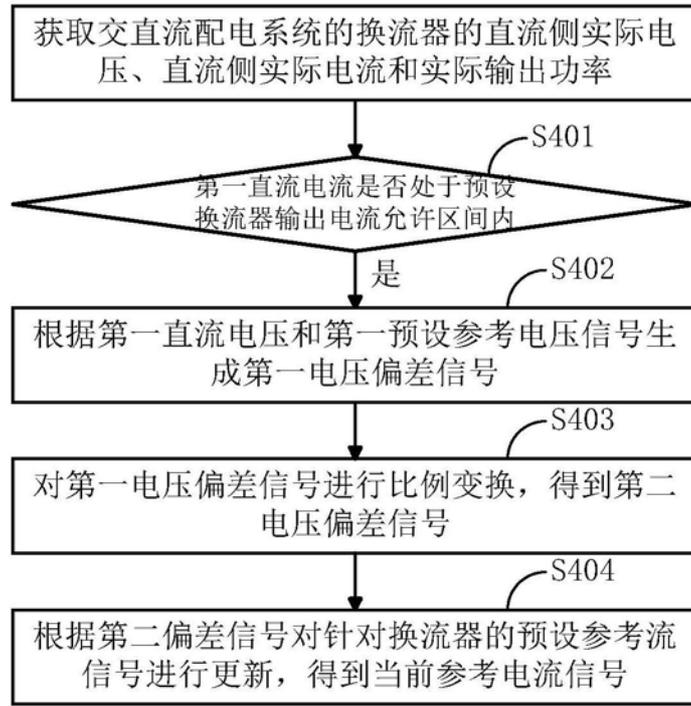


图4

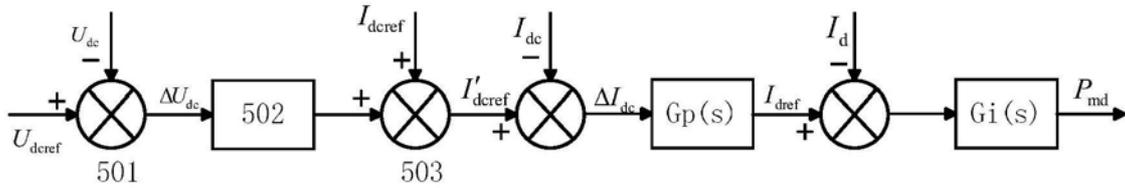


图5

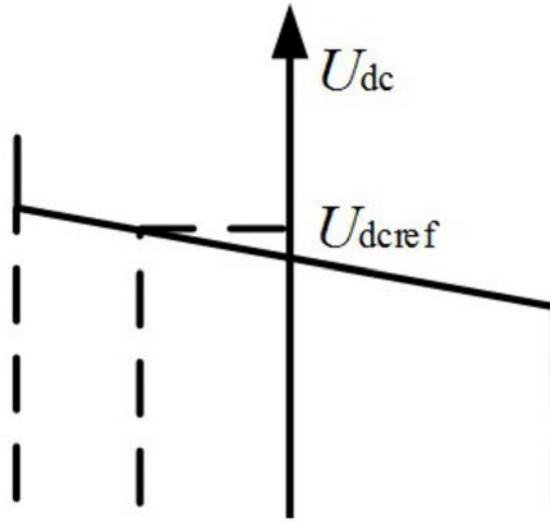


图6

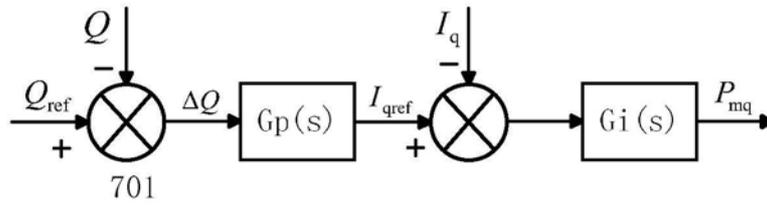


图7

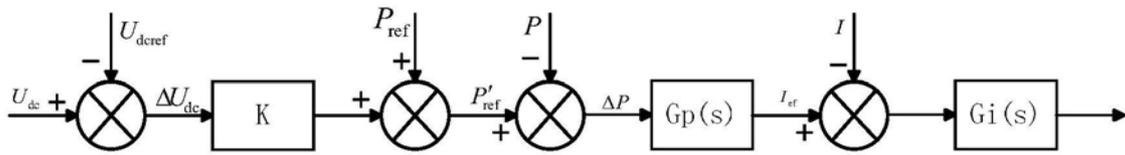


图8

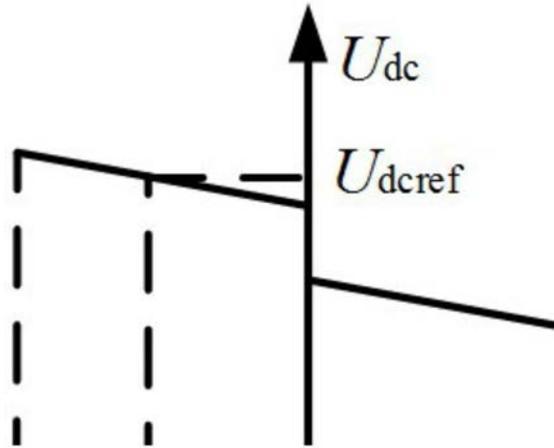


图9

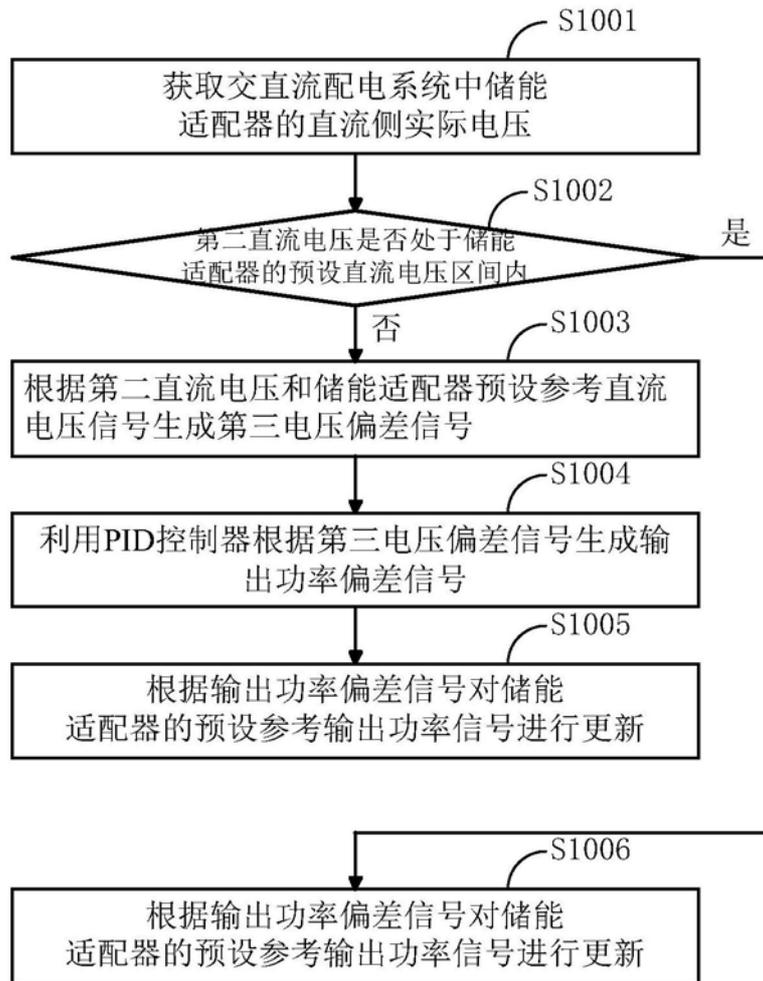


图10

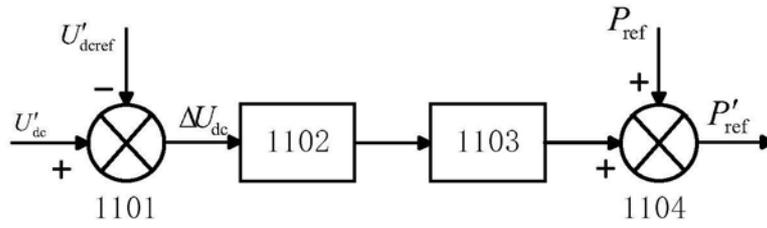


图11

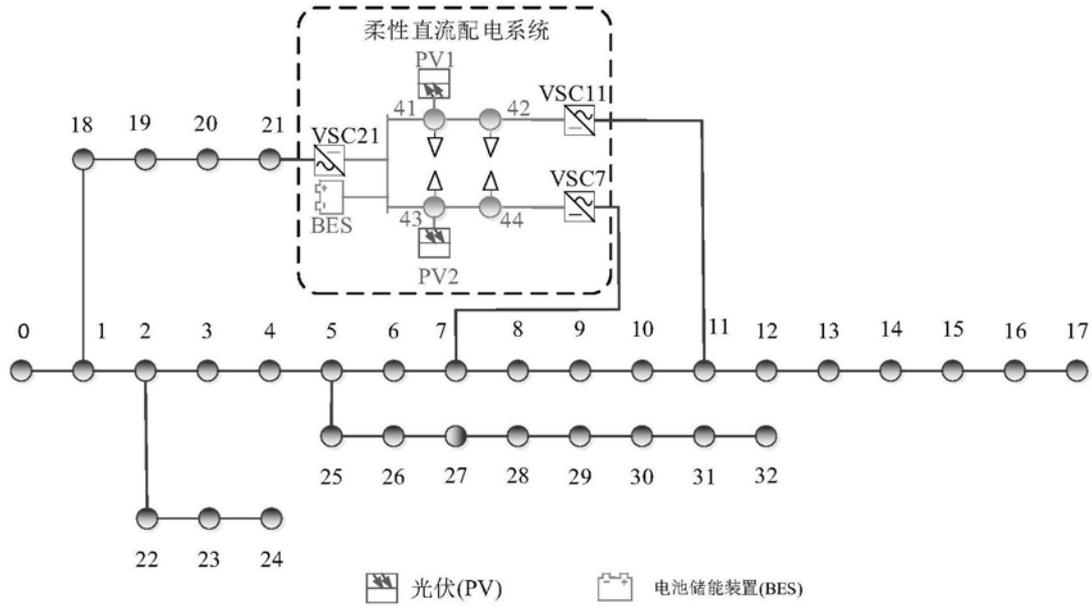


图12

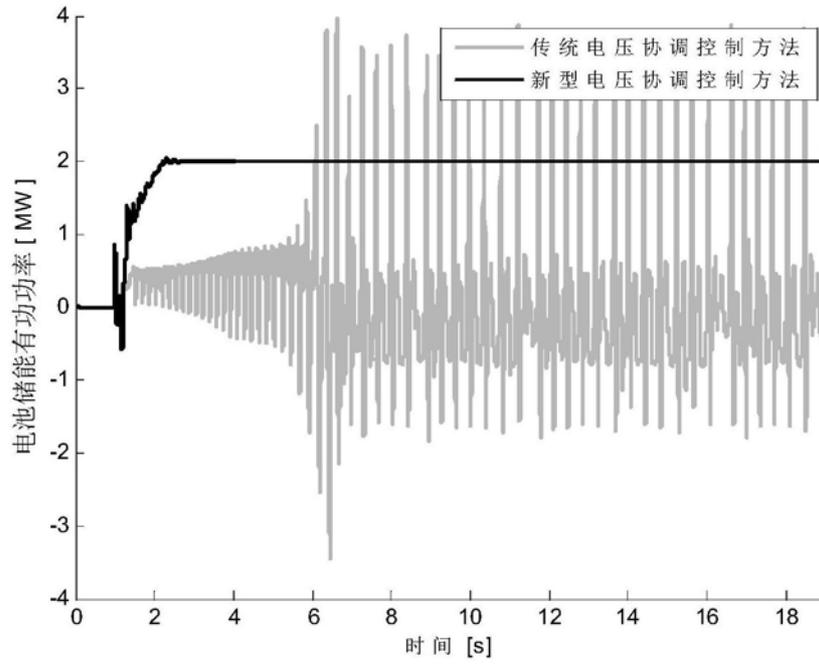


图13

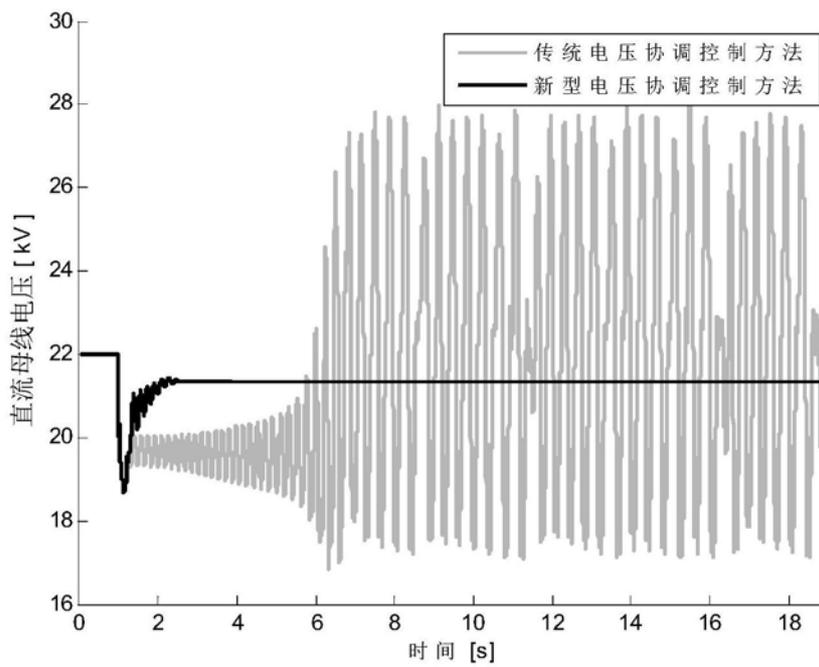


图14

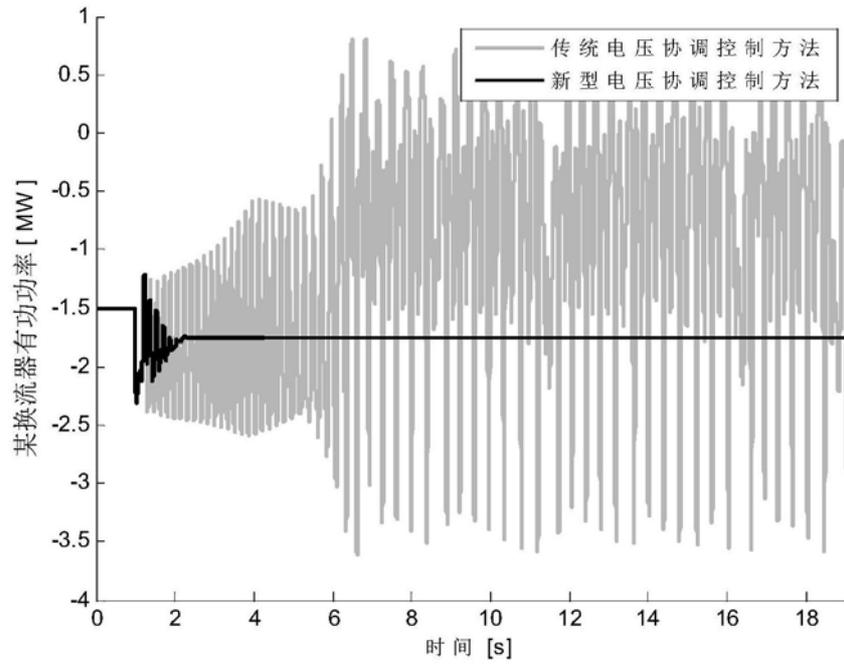


图15

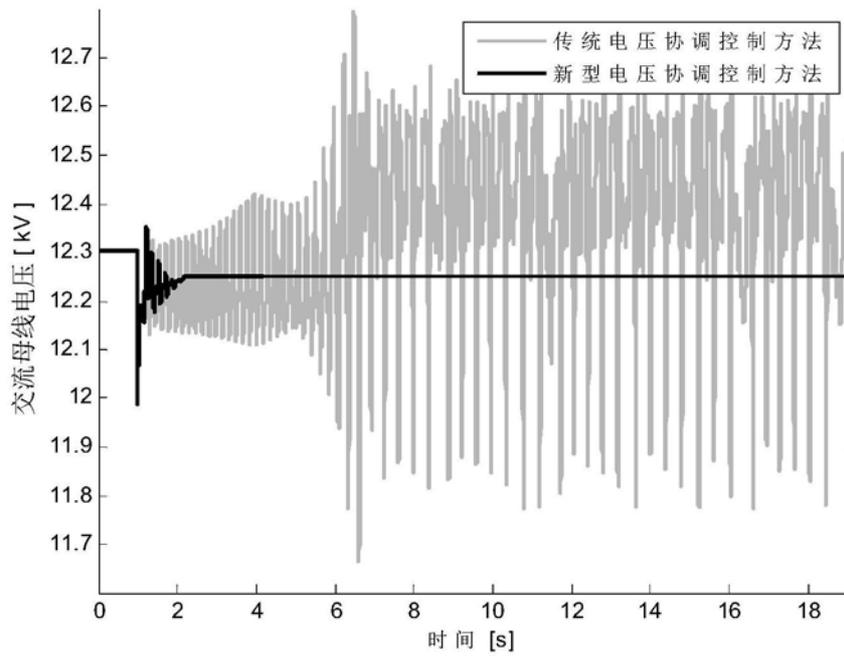


图16