



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111711196 B

(45) 授权公告日 2021.08.13

(21) 申请号 202010636694.3

(22) 申请日 2020.07.03

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111711196 A

(43) 申请公布日 2020.09.25

(73) 专利权人 浙江大学
地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

专利权人 国网北京市电力公司
国网冀北电力有限公司

(72) 发明人 陆玲霞 于淼 杨鹏程 陈勇攀
于希娟 师恩洁 李洪涛 赵贺
何彦彬 沈洋 余谦 王天一
李博伦 常媛 莫小林 吴林林

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公司 33200

代理人 邱启旺

(51) Int.Cl.
H02J 3/02 (2006.01)
H02J 3/00 (2006.01)
H02J 3/28 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 109659941 A, 2019.04.19
CN 107240934 A, 2017.10.10
CN 109193746 A, 2019.01.11

审查员 胡永志

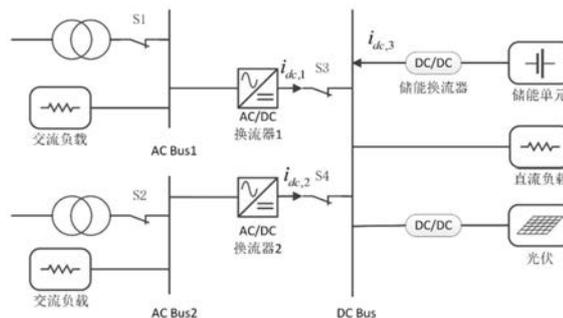
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法

(57) 摘要

本发明提出一种交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法,涉及的交直流混合配电网,为保证供电的可靠性包含两个交流子网,且均通过换流器连接公共电网,交直流子电网间通过两路AC/DC换流器连接,储能系统接在直流侧。该控制方法包括:在正常工作模式下,由两路AC/DC换流器为直流子网提供母线电压支持和功率分担,储能系统仅控制储能SOC,采用定功率控制模式;在单路故障模式下,由一路双向AC/DC换流器和储能系统为直流子电网提供母线电压支持和功率分担;在双路故障模式下,由储能系统提供直流母线电压支持。本发明提出的交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法能够实现正常和故障模式下直流子网的电压稳定、功率自适应分担以及储能SOC调控。



1. 一种交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法,所述混合配电网包括两个交流子网和一个直流子网,两个交流子网分别通过AC/DC换流器与直流子网连接,同时,两个交流子网经AC/AC连接公共电网;其中,所述混合配电网在交流侧接有交流负载,在直流侧接有储能系统和直流负载,所述储能系统中,储能单元通过储能换流器连接到直流子网;其特征在于,该方法包括如下步骤:

(1) 以两个AC/DC换流器和储能换流器作为三个受控电压源,中央控制器通过监控电网运行状态分别对三个受控电压源下发控制指令 ΔV ,实现不同运行模式下的电压稳定、功率自适应分担以及储能SOC调控,具体包括如下三种模式:

(a) 在所述交流子网两路并网均正常时,混合配电网运行于正常工作模式,两路AC/DC换流器正常运行,假定足以满足直流负载功率需求,中央控制器下发指令 ΔV_x ($x=1$ 或 $2,3$) 调控两路AC/DC换流器提供直流母线电压支持,同时校正功率分担比,直流储能换流器只需控制储能SOC,采用定功率控制;指令 ΔV_x ($x=1$ 或 $2,3$) 通过下述方式计算获得:

$$\Delta V_x = (K_{P1} + K_{I1}/s) (v^* - v_{dcbus}) + (K_{P2} + K_{I2}/s) (i_{average} - i_{dc,x}), x=1,2 \quad (1)$$

其中, $x=1,2$,分别表示对应的两个AC/DC换流器的序号, K_{P1}, K_{P2} 分别对应电压量和电流量的PI调节器的比例系数, K_{I1}, K_{I2} 分别对应电压量和电流量的PI调节器的积分系数, $1/s$ 表示PI调节的积分环节, v^* 为直流母线额定电压, v_{dcbus} 为直流母线实际电压, $i_{dc,x}$ 为AC/DC换流器输出电流, $i_{average}$ 为参与直流功率分担的AC/DC换流器的参考电流,电压相同情况下,控制电流比即能实现功率分担;

所述储能换流器仅控制储能SOC,采用定功率控制,中央控制器下发指令 ΔV_3 可以通过下述方式计算获得:

$$\Delta V_3 = \begin{cases} (K_{P2} + K_{I2}/s)(-i_{dc,3,ref} - i_{dc,3}), & \text{soc} < \text{soc}_{min} & \text{充电} \\ (K_{P2} + K_{I2}/s)(0 - i_{dc,3}), & \text{soc}_{max} > \text{soc} > \text{soc}_{min} & \text{不充不放} \\ (K_{P2} + K_{I2}/s)(i_{dc,3,ref} - i_{dc,3}) & \text{soc} > \text{soc}_{max} & \text{放电} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $i_{dc,3,ref}$ 为储能系统定功率控制的充放电参考电流,且 $i_{dc,3,ref} > 0$, $i_{dc,3}$ 为储能系统实际充放电电流, $i_{dc,3} > 0$ 表示储能系统放电, $i_{dc,3} < 0$ 表示储能系统充电;

(b) 在所述交流子网两路并网出现一路故障时,混合配电网运行于单路故障模式,中央控制器切除故障对应的AC/DC换流器,直流电压变成由储能换流器和另一路非故障AC/DC换流器共同支持,中央控制器下发指令 ΔV_x ($x=1$ 或 $2,3$),调控储能换流器和非故障AC/DC换流器参与直流母线电压支持和自适应功率分担;指令 ΔV_x ($x=1$ 或 $2,3$) 通过下述方法计算获得:

$$\Delta V_x = (K_{P1} + K_{I1}/s) (v^* - v_{dcbus}) + (K_{P2} + K_{I2}/s) (i_{average} - i_{dc,x}), x=1 \text{ 或 } 2,3 \quad (3)$$

其中,此处 $i_{dc,x}$, $x=1$ 或 2 ,为非故障AC/DC换流器的实际输出电流, $i_{dc,3}$ 为储能换流器的实际输出电流;

(c) 在所述交流子网双路并网均出现故障时,混合配电网运行于双路故障模式,中央控制器切除双路AC/DC换流器,直流电压仅由储能换流器控制,中央控制器通过下发 ΔV_3 给储能换流器,实现直流电压支持和提供直流负载所需功率; ΔV_3 通过下述方法计算得:

$$\Delta V_3 = (K_{P1} + K_{I1}/s) (v^* - v_{dcbus}) \quad (4)$$

(2) 三个受控电压源的外环控制在采用直流电压下垂控制的基础上,引入电压偏差量,

实现根据 ΔV 分别给出双路AC/DC换流器和储能换流器的直流参考电压 $v_{dc,x,ref}$; 具体如下所示:

$$v_{dc,x,ref} = v^* - ki_{dc,x} + \Delta V_x, x=1,2,3 \quad (5)$$

其中 $v_{dc,x,ref}$ 为受控电压源的输出参考电压, k 为下垂系数, $i_{dc,x}$ 为受控电压源输出电流, ΔV_x 为中央控制器的下发指令;

内环控制为基于PI调节器实现的参考电压跟踪控制, 实现混合配电网运行模式无缝切换控制。

2. 根据权利要求1所述的交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法, 其特征在于, 所述混合配电网在直流侧还接有光伏发电系统, 所述光伏发电系统以最大功率点运行。

一种交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法,属于电力系统和控制系统设计的交叉领域。

背景技术

[0002] 随着能源需求的日渐增长,国内外对新能源分布式发电愈发重视。新能源以微电网的形式接入公共电网并网运行,是发挥新能源分布式发电的最有效方式。由于新能源发电产生的电能大部分为直流电,以及近年来的直流负荷也日益增加,直流微电网得到了高速发展,兼具交流特性和直流特性的交直流混合配电网也随之成为了研究热点。相比于传统的交流配电网,交直流混合配电网在交流的基础上兼具直流电的优势,交直流混合配电网能够直接接入直流负载和分布式电源,且分布式电源能够通过直流母线直接为直流负载供电,减少了对AC/DC换流器的需求。

[0003] 交直流混合配电网由交流子网和直流子网构成,交直流子网间通过AC/DC换流器实现功率交换,其中还包括储能系统、分布式电源、直流负载和交流负载。目前,交直流混合配电网的研究主要包括拓扑结构、控制策略、稳定运行、故障保护和优化调度等方面,其中,多换流器的协调控制和模式切换是配电网稳定运行的关键。关于模式无缝切换控制的现有技术中,主要集中于微电网在并网和孤岛运行模式之间的切换,保证微电网并网和孤岛模式切换的快速性,针对存在多换流器的配电网模式无缝切换控制的研究较少。

发明内容

[0004] 本发明旨在提出一种交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法,用以解决多换流器之间的协调控制问题,实现混合配电网多运行模式的切换控制。

[0005] 为了达到上述目的,本发明具体技术方案如下:

[0006] 一种交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法,所述混合配电网包括两个交流子网和一个直流子网,两个交流子网分别通过AC/DC换流器与直流子网连接,同时,两个交流子网经AC/AC连接公共电网;其中,所述混合配电网在交流侧接有交流负载,在直流侧接有储能系统和直流负载,所述储能系统中,储能单元通过储能换流器连接到直流子网。该方法包括如下步骤:

[0007] (1) 以两个AC/DC换流器和储能换流器作为三个受控电压源,中央控制器通过监控电网运行状态分别对三个受控电压源下发控制指令 ΔV_x ($x=1,2,3$),其中,1表示第一AC/DC换流器,2表示第二AC/DC换流器,3表示储能换流器;实现不同运行模式下的电压稳定、功率自适应分担以及储能SOC调控,具体包括如下三种模式:

[0008] (a) 正常运行模式下,双路AC/DC换流器足以满足直流负荷功率需求,中央控制器下发指令 ΔV 调节双路AC/DC换流器为直流母线提供电压支持和功率分担,该运行模式下,储能换流器仅控制储能SOC,采用定功率控制;

[0009] (b) 单路故障模式下,切除故障路的AC/DC换流器,中央控制器下发指令 ΔV 调节储

能换流器和非故障AC/DC换流器为直流母线电压提供电压支持和功率分担。

[0010] (c) 双路故障模式下,双路AC/DC换流器均被切除,直流负荷功率需求由储能换流器提供,中央控制器下发指令 ΔV 调节储能换流器为直流母线提供电压支持和功率需求。

[0011] (2) 三个受控电压外环控制均采用一致的直流电压下垂控制,根据直流母线额定电压和三个受控电压源的实际输出电流,并引入中央控制器的下发指令 ΔV ,可以分别计算得到三个受控电压源的参考电压。

[0012] (3) 本发明根据在(2)中计算得到了三台受控电压源的直流输出参考电压,在受控电压源中用PI调节实现对输出参考电压的跟踪,从而实现混合配电网在正常运行和故障模式下的电压支持、功率自适应分担以及储能SOC调控。

[0013] 进一步,所述正常工作模式下中央控制器下发给双路AC/DC换流器的控制指令 ΔV_x ($x=1,2$)是通过下述方式计算获得:

$$[0014] \quad \Delta V_x = (K_{P1} + K_{I1}/s)(v^* - v_{dcbus}) + (K_{P2} + K_{I2}/s)(i_{average} - i_{dc,x}), x=1,2 \quad (1)$$

[0015] 其中, $x=1,2$,分别表示对应的两个AC/DC换流器的序号, K_{P1}, K_{P2} 分别对应电压量和电流量的PI调节器的比例系数, K_{I1}, K_{I2} 分别对应电压量和电流量的PI调节器的积分系数, $1/s$ 表示PI调节的积分环节, v^* 为直流母线额定电压, v_{dcbus} 为直流母线实际电压, $i_{dc,x}$ 为AC/DC换流器输出电流, $i_{average}$ 为参与直流功率分担的AC/DC换流器的参考电流,电压相同情况下,控制电流比即能实现功率分担。

[0016] 所述储能换流器仅控制储能SOC,采用定功率控制,中央控制器下发指令 ΔV_3 可以通过下述方式计算获得:

$$[0017] \quad \Delta V_3 = \begin{cases} (K_{P2} + K_{I2}/s)(-i_{dc,3,ref} - i_{dc,3}), & soc < soc_{min} & \text{充电} \\ (K_{P2} + K_{I2}/s)(0 - i_{dc,3}), & soc_{max} > soc > soc_{min} & \text{不充不放} \\ (K_{P2} + K_{I2}/s)(i_{dc,3,ref} - i_{dc,3}) & soc > soc_{max} & \text{放电} \end{cases} \quad (2)$$

[0018] 其中, $i_{dc,3,ref}$ 为储能系统定功率控制的充放电参考电流,且 $i_{dc,3,ref} > 0, i_{dc,3}$ 为储能系统实际充放电电流, $i_{dc,3} > 0$ 表示储能系统放电, $i_{dc,3} < 0$ 表示储能系统充电。

[0019] 进一步地,所述单路故障模式下中央控制器下发给储能换流器和非故障AC/DC换流器的控制指令 ΔV_x ($x=1$ 或 $2,3$)可以通过下述方法计算获得:

[0020] $\Delta V_x = (K_{P1} + K_{I1}/s)(v^* - v_{dcbus}) + (K_{P2} + K_{I2}/s)(i_{average} - i_{dc,x}), x=1$ 或 $2,3$ (3) 其中,此处 $i_{dc,x}, x=1$ 或 2 ,为非故障AC/DC换流器的实际输出电流, $i_{dc,3}$ 为储能换流器的实际输出电流。

[0021] 进一步地,所述双路故障模式下中央控制器下发给储能换流器的控制指令 ΔV_3 可以通过下述方法计算得:

$$[0022] \quad \Delta V_3 = (K_{P1} + K_{I1}/s)(v^* - v_{dcbus}) \quad (4)$$

[0023] 进一步地,所述步骤2中,三个受控电压源的外环控制在采用直流电压下垂控制的基础上,引入电压偏差量,实现根据 ΔV 分别给出双路AC/DC换流器和储能换流器的直流参考电压 $v_{dc,x,ref}$,具体如下所示:

$$[0024] \quad v_{dc,x,ref} = v^* - ki_{dc,x} + \Delta V_x, x=1,2,3 \quad (5)$$

[0025] 其中 $v_{dc,x,ref}$ 为受控电压源的输出参考电压, k 为下垂系数, $i_{dc,x}$ 为受控电压源输出电流, ΔV_x 为中央控制器的下发指令。

[0026] 进一步地,所述混合配电网在直流侧还接有光伏发电系统,所述光伏发电系统以最大功率点运行。

[0027] 与现有技术相比,本发明的优点在于实现了多子网交直流混合配电网的多换流器之间的协调控制,所提出的无缝切换控制方法基于直流电压下垂控制,在正常运行模式和故障模式之前切换无需改变受控电压源的底层控制,通过调整中央控制器的下发指令即可保证直流母线的稳定,多换流器之间自适应功率分担以及储能SOC控制,能够保证混合配电网运行模式无缝切换控制。

附图说明

[0028] 图1为本发明所涉及的交直流混合配电网拓扑图;

[0029] 图2为混合配电网正常工作模式;

[0030] 图3为AC/DC换流器内环控制原理图;

[0031] 图4为储能换流器内环控制原理图。

具体实施方式

[0032] 本发明提出了一种交直流混合配电网运行模式无缝切换控制方法,这种方法在直流电压下垂控制的基础上引入电压偏差量,该电压偏差量为中央控制器的下发指令,中央控制器通过该下发指令实现对受控电压源的协调控制,从而实现直流母线的电压支持、功率自适应分担以及储能SOC控制。在正常工作模式下,直流负载的功率需求由两路AC/DC换流器满足,储能采用定功率控制,实现储能SOC控制;在单路故障模式下,由储能换流器和非故障路AC/DC换流器实现直流母线电压支持和功率分担;在双路故障模式下,直流负载功率需求由储能换流器满足,直流母线电压也由储能换流器提供支持。

[0033] 下面结合附图对本发明作进一步详细描述:

[0034] 考虑到直流子网中光伏模块为最大功率点跟踪控制,且被假定为输出功率恒定,故对本发明提出的模式无缝切换控制方法没有作用,在实例分析中不考虑光伏,则混合配电网正常工作模式如图2所示,直流子网存在三个受控电压源两路AC/DC换流器以及储能系统,储能系统由储能换流器控制。分别标序号表示,其中,1表示第一AC/DC换流器,2表示第二AC/DC换流器,3表示储能换流器;

[0035] 在正常工作模式下,图2中断路器S1、S2、S3、S4均处于闭合状态,双路AC/DC换流器足以满足直流负载的功率需求,中央控制器下发指令 ΔV_1 和 ΔV_2 调节双路AC/DC换流器为直流母线提供电压支持和功率分担,控制指令 ΔV_1 和 ΔV_2 可以通过公式(1)计算得到;该运行模式下,储能系统仅控制储能SOC,采用定功率控制,中央控制器下发的控制指令 ΔV_3 可以通过公式(2)计算得到。当图2中断路器S1或S2意外断开时,混合配电网工作于单路故障模式,以S1断开为例说明:当检测到S1意外断开时,中央控制器主动断开S3,并调节下发给储能换流器的控制指令 ΔV_3 ,令储能系统为直流母线提供电压支持以及和AC/DC换流器2分担直流负荷功率需求,单路故障模式下储能换流器的控制指令 ΔV_3 可以通过公式(3)计算得到,AC/DC换流器2的控制指令 ΔV_2 与正常工作模式相同。当图2中S1和S2均发生意外断开,混合配电网工作于双路故障模式:当检测到S1、S2断开,中央控制器主动断开S3和S4,并调节下发给储能换流器的控制指令 ΔV_3 ,令储能系统为直流母线提供电压支持,并全部承担

直流负载的功率需求,双路故障模式下的储能换流器控制指令 ΔV_3 可以通过公式(4)计算得到。

[0036] 图2所示混合配电网中,直流侧共存在三个受控电压源:双路AC/DC换流器以及储能换流器。三个受控电压源外环控制均基于直流电压下垂控制,并引入了电压偏差量 ΔV_x ,该电压偏差量作为模式切换的控制指令由中央控制器根据混合配电网的运行模式分别给出,据此可以分别计算出受控电压源内环控制的参考电压,具体实现如公式(5)所示。

[0037] 两路AC/DC换流器采用相同的控制,其内环控制原理图如图3所示,主要包括电压内环、电流内环和脉冲发生器模块, $x=1$ 表示第一AC/DC换流器, $x=2$ 表示第二AC/DC换流器。首先将采集到的交流侧三相电压 $v_{x,abc}$ 和三相电流 $i_{x,abc}$,计算有功功率 P_x 和无功功率 Q_x ,并将 $i_{x,abc}$ 进行Park变换,如式(6)所示,计算得到电流d轴分量 $i_{x,d}$,q轴分量 $i_{x,q}$ 和0轴分量 $i_{x,0}$ 。

$$[0038] \quad \begin{bmatrix} i_{x,d} \\ i_{x,q} \\ i_{x,0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} i_{x,abc} \quad (6)$$

[0039] 为了得到参考脉冲发生器的参考交流电压 $v_{x,abc}^*$,需先得到dq0坐标系下的参考电压分量 $v_{x,d}^*$, $v_{x,q}^*$ 和 $v_{x,0}^*$ 。为了得到 $v_{x,d}^*$,将外环控制得到的直流参考电压 $v_{dc,x,ref}$ 减去实际输出直流电压 $v_{dc,x}$,再经PI调节得到内环电流参考值 $i_{x,dref}$,用 $i_{x,d}$ 减去 $i_{x,dref}$,经过PI调节即可;为了得到 $v_{x,q}^*$,由于直流侧不考虑无功功率,将计算得到的交流侧无功功率 Q_x 与0相减,经过PI调节得到内环参考电流 $i_{x,qref}$,用 $i_{x,q}$ 减去 $i_{x,qref}$,经过PI调节即可;为了得到 $v_{x,0}^*$,将计算的得到的0轴分量 i_0 减去0轴参考值0,再经PI调节即可。由得到的 $v_{x,d}^*$, $v_{x,q}^*$ 和 $v_{x,0}^*$ 转化为 $v_{x,abc}^*$ 需经过反Park变换,如式(7)所示。

$$[0040] \quad v_{x,abc}^* = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x,d}^* \\ v_{x,q}^* \\ v_{x,0}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0041] $v_{x,abc}^*$ 通过脉冲发生器模块,与三角载波比较即能产生6个脉冲信号,用以控制AC/DC换流器6个IGBT开关管的开通和关断,从而实现AC/DC换流器实际输出直流电压跟踪外环控制给定直流参考电压 $v_{dc,x,ref}$ 。

[0042] 储能换流器内环控制原理如图4所示,同样是包括电压内环、电流内环和脉冲发生器。将外环控制给出的 $v_{dc,3,ref}$ 与测得的储能换流器实际输出电压 $v_{dc,3}$ 相减,经过PI调节得到电流内环参考值 $i_{dc,3,ref}$,再将 $i_{dc,3,ref}$ 与储能换流器实际输出电流 $i_{dc,3}$ 相减,经过PI调节,在输入到脉冲发生器即可得到储能换流器的开关管脉冲信号。使用获得的开关管脉冲信号控制储能换流器的开关管开通和关断,能够实现储能换流器实际输出跟踪外环控制给定的参考电压 $v_{dc,3,ref}$ 。

[0043] 中央控制器根据混合配电网实际运行模式调节下发控制指令 $\Delta V_x (x=1, 2, 3)$, 双路AC/DC换流器和储能换流器外环控制采用直流下垂控制, 引入电压偏差量, 实现根据 ΔV_x 分别给出双路AC/DC换流器和储能换流器的直流参考电压 $v_{dc,x,ref}$, 在内环控制实现对外环控制给定参考电压 $v_{dc,x,ref}$ 的跟踪, 从而实现混合配电网正常工作模式和故障模式下的直流母线电压支持、功率自适应分担以及储能SOC控制。

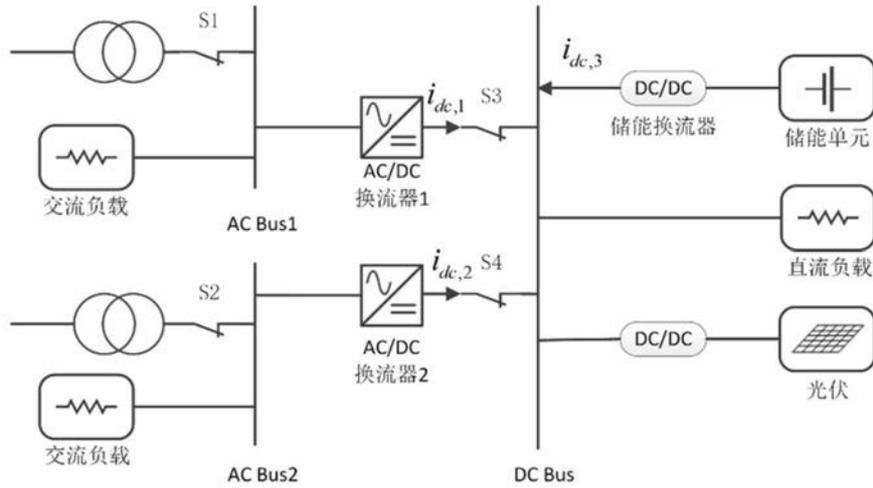


图1

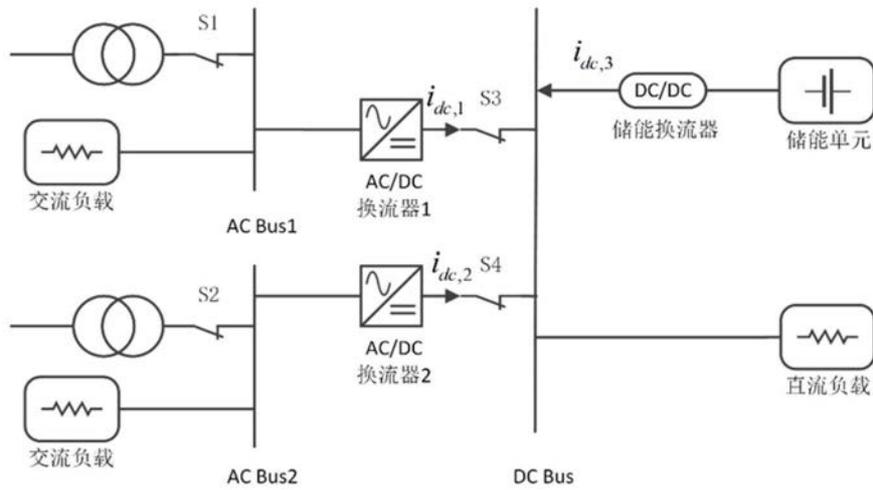


图2

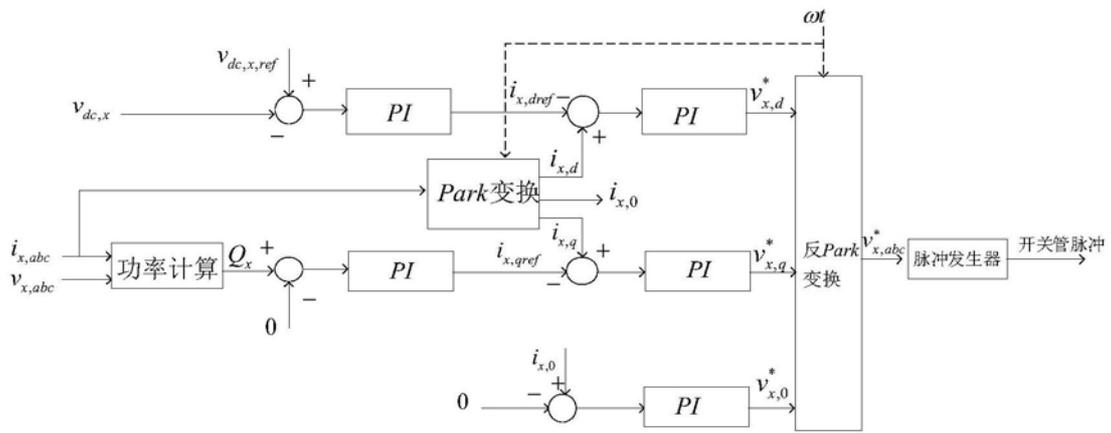


图3

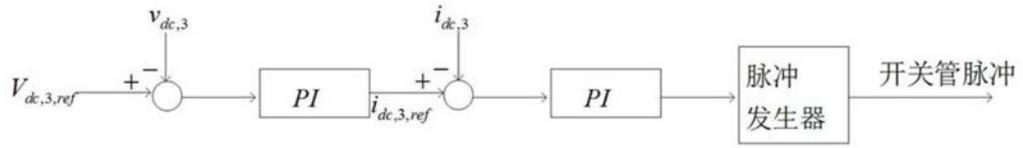


图4