(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106469915 A
(43)申请公布日 2017.03.01

(21)申请号 201510498366.0

(22)申请日 2015.08.13

(71)申请人 中国电力科学研究院
地址 210025 江苏省南京市鼓楼区南瑞路8号
申请人 国家电网公司 国网新疆电力公司

(72)发明人 张晓琳 郑飞 张军军 黄晶生 刘美茵 杨永利 张锋 王衡 王开科

(74)专利代理机构 北京安博达知识产权代理有限公司 11271
代理人 徐国文

(51)Int.Cl.
H02J 3/38(2006.01)
H02J 3/16(2006.01)
H02M 7/48(2007.01)

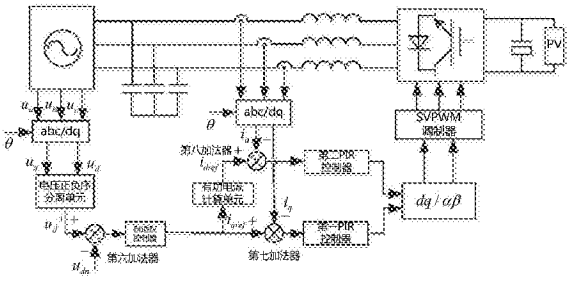
权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54)发明名称

一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法

(57)摘要

本发明提供了一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，包括步骤1：采集电压电流双环控制的直流电压指令值V_{dc}^{*}和电流指令值i_{d}^{*}；步骤2：断开电压电流双环控制中的直流电压外环控制；步骤3：构建新的电网电压外环控制，包括基于自适应控制器的外环控制电路和基于PIR控制器的内环控制电路；步骤4：当电网电压在预置时间内恢复正常后，断开基于自适应控制器的外环控制电路；步骤5：将直流电压指令值V_{dc}^{*}赋值到直流电压外环控制中MPPT控制器的参考电压，重新对电网进行直流电压外环控制和并网电流内环控制。与现有技术相比，本发明提供的一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，检测到电网电压跌落后，控制策略快速切换，保证光伏并网。



CN 106469915 A

1.一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，所述方法包括对光伏并网逆变器进行电压电流双环控制；电网正常时，所述电压电流双环控制包括直流电压外环控制和并网电流内环控制；其特征在于，电网故障时，所述电压电流双环控制包括电网电压外环控制和所述并网电流内环控制；所述方法包括：

步骤1：采集电网发生故障时所述直流电压外环控制的直流电压指令值V_{dc}^{*}和所述并网电流内环控制的电流指令值i_d^{*}；

步骤2：断开所述直流电压外环控制；

步骤3：构建所述电网电压外环控制的控制电路，以向所述并网电流内环控制输出有功电流指令i_{dref}；所述电网电压外环控制和并网电流内环控制组成电网故障时的电压电流双环控制，向所述光伏并网逆变器输出三相调制信号，驱动光伏并网逆变器工作；

步骤4：当电网电压在预置时间内恢复正常后，断开所述电网电压外环控制；

步骤5：将存储的所述直流电压指令值V_{dc}^{*}赋值到直流电压外环控制中MPPT控制器的参考电压，所述光伏并网逆变器重新对电网进行直流电压外环控制和并网电流内环控制。

2.如权利要求1所述的方法，其特征在于，所述直流电压外环控制的控制电路包括所述MPPT控制器和抗饱和PI控制器；

所述MPPT控制器的输入端接入电网中光伏发电单元与并网光伏逆变器之间，输出端与抗饱和PI控制器连接；所述抗饱和PI控制器的输出端接入所述并网电流内环控制中第一PI控制器的输入端；

所述MPPT控制器与抗饱和PI控制器之间连接有第一加法器；所述第一加法器的输入信号包括MPPT控制器输出的直流电压指令值V_{dc}^{*}和所述光伏发电单元输出的电压值V_{dc}，输出信号为电压值$V_1=V_{dc}-V_{dc}^{*}$；

所述抗饱和PI控制器与第一PI控制器之间连接有第二加法器；所述第二加法器的输入信号包括抗饱和PI控制器输出的有功电流指令值i_d^{*}和电网中输电线路流过的有功电流值i_d，输出信号为电流值$i_2=i_d^{*}-i_d$。

3.如权利要求1所述的方法，其特征在于，所述并网电流内环控制的控制电路包括第一PI控制器、第二PI控制器、信号变换单元和SVPWM调制器；

所述第一PI控制器与信号变换单元之间连接有第三加法器；所述第三加法器的输入信号 包括第一PI控制器的输出信号和电流值ωi_q，第三加法器的输出信号为第一PI控制器的输出信号与电流值ωi_q的差值；

所述第二PI控制器的输入端与第四加法器连接，输出端依次通过第五加法器、所述信号变换单元和所述SVPWM调制器接入所述并网光伏逆变器；

所述第四加法器的输入信号包括无功电流指令值i_q^{*}和电网中输电线路流过的无功电流值i_q，输出信号为$i_4=i_q^{*}-i_q$；所述第五加法器的输入信号包括第二PI控制器的输出信号和电流值ωi_d，第五加法器的输出信号为第二PI控制器的输出信号与电流值ωi_d的差值；

其中，ω 为电网电压角频率，i_q^*依据所述直流电压外环控制中抗饱和 PI 控制器输出的有功电流指令值 i_d^* 和电网要求光伏逆变器输出电流的功率因数计算得到，i_d为电网中输电线路流过的有功电流值。

4. 如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述信号变换单元为 dq/α β 变换单元，接收第一 PI 控制器和第二 PI 控制器的输出信号，并将其由 dq 坐标系信号变换为 α β 坐标系信号。

5. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述电网故障时电压电流双环控制的控制电路包括依次连接的锁相环、电压正负序分离单元、自适应控制器、第一 PIR 控制器和第二 PIR 控制器；

所述锁相环的输入端接入电网输电线路，获取三相电网电压的正序相角 θ；

所述电压正负序分离单元与自适应控制器之间连接有第六加法器，所述第六加法器的输入信号包括电压正负序分离单元输出的电网电压正序分量u_d^+和 dq 坐标系下电网电压额定值的 d 轴分量 u_{dn}，输出信号为$u_6=u_d^+-u_{dn}$；

所述自适应控制器的一个输出端通过第七加法器与所述第一 PIR 控制器连接，另一个输出端通过有功电流计算单元与第八加法器连接；所述第八加法器的输出端与第二 PIR 控制器连接；所述第七加法器的输入信号包括自适应控制器输出的无功电流指令值 i_{qref}和电网中输电线路流过的无功电流值 i_q，输出信号为 $i_7=i_{qref}-i_q$；所述第八加法器的输入信号包括有功电流计算单元输出的有功电流指令值 i_{dref}和电网中输电线路流过的有功电流值 i_d，输出信号为 $i_8=i_{dref}-i_d$；

所述第一 PIR 控制器和第二 PIR 控制器的输出端均依次通过信号变换单元和 SVPWM 调制器接入所述并网光伏逆变器。

6. 如权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述信号变换单元为 dq/α β 变换单元，接收第一 PIR 控制器和第二 PIR 控制器的输出信号，并将其由 dq 坐标系信号变换为 α β 坐标系信号。

7. 如权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述自适应控制器为 P 控制器，其控制参数 K_p的计算公式为：

$$K_p \geq \frac{1.5\times(0.9-h)}{u_{dn}\times(1-h)}i_n \qquad (1)$$

其中，h 为电网电压正序分量u_d^+跌落至电网电压额定值的百分比；u_{dn}为 dq 坐标系下电网电压额定值的 d 轴分量，i_n为光伏并网逆变器的额定电流。

8. 如权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述自适应控制器输出的无功电流指令值 i_{qref}的上限值 i_{q_max} 为：

$i_{q_max}=ki_n$ (2)

其中，$k>1.05$，i_n为光伏并网逆变器的额定电流；

所述无功电流指令值 i_{qref}的下限值 i_{q_min} 的计算公式为：

$$\begin{cases} i_q_min = 0 & h > 0.9 \\ i_q_min = 1.5(0.9-h)i_n & 0.2 \le h \le 0.9 \\ i_q_min = 1.05i_n & h < 0.2 \end{cases} \quad (3)$$

其中，i_n为光伏并网逆变器的额定电流。

9.如权利要求5所述的方法，其特征在于，所述有功电流计算单元输出的有功电流指令值i_{dref}的计算公式为：

$$i_{dref} = min\{\sqrt{(i_{max})^2 - i_{qref}{}^2}, i_d^*\} \quad (4)$$

其中，i_{max}为光伏并网逆变器能够承受的最大电流，i_{qref}为自适应控制器输出的无功电流 指令值i_{qref}，i_d^*为电网故障时刻采集到的并网电流内环控制的电流指令值。

一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光伏并网发电领域，具体涉及一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法。

背景技术

[0002] 随着光伏装机容量在电网中所占的比重不断增大，光伏并网逆变器对电网的影响也日益突出。当电网电压跌落至一定值时，常规的小规模光伏发电系统为保护光伏系统安全脱离电网，这在光伏发电所占比例较低的电网中是可以的。但是对于大规模光伏系统接入电网，光伏系统的脱网可能会造成电网电压和频率的崩溃，对电网的稳定性产生较大的危害。因此，光伏电站必须具备低电压穿越能力，这也是光伏电站大规模发展的必要条件。

[0003] 针对光伏逆变器低电压穿越而制定的标准较少，一般等同采用已有的风电标准，如：1) 美国针对风电低电压穿越，要求风电场必须具备在电压跌落至 15％额定电压时能够维持并网运行 625ms 的低电压穿越能力；2) 德国于 2008 年明确要求在电压跌落期间光伏逆变器必须提供无功电流支撑电网电压，且详细规定了无功电流和电压跌落深度的关系，同时限制无功电流响应速度在 20ms 内；3) 德国联邦能源和水资源协会在 2010 年制定的《发电站接入中压电网技术导则》针对光伏低电压穿越部分的检测进行了特别补充说明，规定了光伏电站中的逆变器需具备零电压穿越功能。

[0004] 目前国家电网公司制定的企业标准 Q/GDW 617-2011《光伏电站接入电网技术规定》(Q/GDW 617-2011) 和标准 GB/T 19964-2012《光伏发电站接入电力系统技术规定》对大中型光伏电站中的光伏并网逆变器低电压穿越均有明确规定。Q/GDW 617-2011 指出：“大中型光伏电站应具备一定的低电压穿越能力；电力系统发生不同类型故障时，光伏电站必须具有在电压跌至 20％额定电压时能够维持并网运行 1s 的低电压穿越能力；并网点电压在发生跌落后 3s 内能够恢复到额定电压的 90％时，光伏电站必须保持并网运行，且规定光伏电站低电压穿越期间宜具备动态无功支撑能力”。标准 GB/T 19964 指出：“大中型光伏电站应具备一定的低电压穿越能力；电力系统发生不同类型故障时，光伏电站必须具备零电压穿越能力，电网电压跌至零时能够维持并网运行 150ms 的低电压穿越能力；电网电压跌至 20％额定电压时能够维持并网运行 625ms 的低电压穿越能力；并网点电压在发生跌落后 2s 内能够恢复到额定电压 的 90％时，光伏电站必须保持并网运行”，且对电网电压不同跌落深度时的动态无功电流补偿量、响应时间及电网故障恢复后的有功功率恢复速度作了详细规定。

[0005] 电网故障类型包含对称故障和不对称故障，光伏并网逆变器通常没有类似 Crowbar 那样的硬件电路来消耗电网故障期间多余的能量，主要依靠自身的控制来实现故障穿越。目前针对光伏并网逆变器故障穿越，国内外文献主要以电网侧输出有功功率恒定或者并网输出电流无负序分量为控制目标，通常采用电流双 dq 坐标系下矢量控制。存在的问题是：1) 没有过多考虑电网电压不对称跌落期间光伏并网逆变器向发出动态无功电流支撑；2) 双 dq 坐标系下电流矢量控制在电网不对称故障不严重时，具有较好的控制性能；

但是电网不对称故障严重时，电流正负序分离引入的滤波器，增加控制系统延时，电网电压故障发生及恢复的瞬间通常会产生电流冲击，大大影响系统暂态性能，使得光伏系统低电压穿越能力下降。

[0006] 因此，需要提供一种适用于各种电网电压故障下，光伏并网逆变器低电压故障穿越期间自适应动态无功补偿方法，消除并网电流负序分量，保证故障期间光伏并网逆变器不脱网运行，有效提供动态无功支撑，能够最大限度地确保电网安全稳定运行。

发明内容

[0007] 为了满足现有技术的需要，本发明提供了一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法。

[0008] 本发明的技术方案是：

[0009] 所述方法包括对光伏并网逆变器进行电压电流双环控制；电网正常时，所述电压电流双环控制包括直流电压外环控制和并网电流内环控制；其特征在于，电网故障时，所述电压电流双环控制包括电网电压外环控制和所述并网电流内环控制；所述方法包括：

[0010] 步骤1：采集电网发生故障时所述直流电压外环控制的直流电压指令值V_{dc}^{*}和所述并网电流内环控制的电流指令值i_d^{*}；

[0011] 步骤2：断开所述直流电压外环控制；

[0012] 步骤3：构建所述电网电压外环控制的控制电路，以向所述并网电流内环控制输出有功电流指令i_{dref}；所述电网电压外环控制和并网电流内环控制组成电网故障时的电压电流双环控制，向所述光伏并网逆变器输出三相调制信号，驱动光伏并网逆变器工作；

[0013] 步骤4：当电网电压在预置时间内恢复正常后，断开所述电网电压外环控制；

[0014] 步骤5：将存储的所述直流电压指令值V_{dc}^{*}赋值到直流电压外环控制中MPPT控制器的参考电压，所述光伏并网逆变器重新对电网进行直流电压外环控制和并网电流内环控制。

[0015] 优选的，所述直流电压外环控制的控制电路包括所述MPPT控制器和抗饱和PI控制器；

[0016] 所述MPPT控制器的输入端接入电网中光伏发电单元与并网光伏逆变器之间，输出端与抗饱和PI控制器连接；所述抗饱和PI控制器的输出端接入所述并网电流内环控制中第一PI控制器的输入端；

[0017] 所述MPPT控制器与抗饱和PI控制器之间连接有第一加法器；所述第一加法器的输入信号包括MPPT控制器输出的直流电压指令值V_{dc}^{*}和所述光伏发电单元输出的电压值V_{dc}，输出信号为电压值$V_1=V_{dc}-V_{dc}^{*}$；

[0018] 所述抗饱和PI控制器与第一PI控制器之间连接有第二加法器；所述第二加法器的输入信号包括抗饱和PI控制器输出的有功电流指令值i_d^{*}和电网中输电线路流过的有功电流值i_d，输出信号为电流值$i_2=i_d^{*}-i_d$；

[0019] 优选的，所述并网电流内环控制的控制电路包括第一PI控制器、第二PI控制器、

信号变换单元和SVPWM调制器；

[0020] 所述第一PI控制器与信号变换单元之间连接有第三加法器；所述第三加法器的输入信号包括第一PI控制器的输出信号和电流值 ωi_q，第三加法器的输出信号为第一PI控制器的输出信号与电流值 ωi_q 的差值；

[0021] 所述第二PI控制器的输入端与第四加法器连接，输出端依次通过第五加法器、所述信号变换单元和所述SVPWM调制器接入所述并网光伏逆变器；

[0022] 所述第四加法器的输入信号包括无功电流指令值 i_q^* 和电网中输电线路流过的无功电流值 i_q，输出信号为 $i_4=i_q^*-i_q$；所述第五加法器的输入信号包括第二PI控制器的输出信号和电流值 ωi_d，第五加法器的输出信号为第二PI控制器的输出信号与电流值 ωi_d 的差值；

[0023] 其中，ω 为电网电压角频率，i_q^* 依据所述直流电压外环控制中抗饱和PI控制器输出的有功电流指令值 i_d^* 和电网要求光伏逆变器输出电流的功率因数计算得到，i_d 为电网中输电线路流过的有功电流值；

[0024] 优选的，所述信号变换单元为dq/α β变换单元，接收第一PI控制器和第二PI控制器的输出信号，并将其由dq坐标系信号变换为α β坐标系信号；

[0025] 优选的，所述电网故障时电压电流双环控制的控制电路包括依次连接的锁相环、电压正 负序分离单元、自适应控制器、第一PIR控制器和第二PIR控制器；

[0026] 所述锁相环的输入端接入电网输电线路，获取三相电网电压的正序相角 θ；

[0027] 所述电压正负序分离单元与自适应控制器之间连接有第六加法器，所述第六加法器的输入信号包括电压正负序分离单元输出的电网电压正序分量 u_d^+ 和dq坐标系下电网电压额定值的d轴分量 u_{dn}，输出信号为 $u_6=u_d^+-u_{dn}$；

[0028] 所述自适应控制器的一个输出端通过第七加法器与所述第一PIR控制器连接，另一个输出端通过有功电流计算单元与第八加法器连接；所述第八加法器的输出端与第二PIR控制器连接；所述第七加法器的输入信号包括自适应控制器输出的无功电流指令值 i_{qref} 和电网中输电线路流过的无功电流值 i_q，输出信号为 $i_7=i_{qref}-i_q$；所述第八加法器的输入信号包括有功电流计算单元输出的有功电流指令值 i_{dref} 和电网中输电线路流过的有功电流值 i_d，输出信号为 $i_8=i_{dref}-i_d$；

[0029] 所述第一PIR控制器和第二PIR控制器的输出端均依次通过信号变换单元和SVPWM调制器接入所述并网光伏逆变器。；

[0030] 优选的，所述信号变换单元为dq/α β变换单元，接收第一PIR控制器和第二PIR控制器的输出信号，并将其由dq坐标系信号变换为α β坐标系信号；

[0031] 优选的，所述自适应控制器为P控制器，其控制参数 K_p 的计算公式为：

[0032] $$K_p \geq \frac{1.5\times(0.9-h)}{u_{dn}\times(1-h)} i_n \qquad (1)$$

[0033] 其中，h为电网电压正序分量 u_d^+ 跌落至电网电压额定值的百分比；u_{dn} 为dq坐标系下电网电压额定值的d轴分量，i_n 为光伏并网逆变器的额定电流；

[0034] 优选的，所述自适应控制器输出的无功电流指令值 i_{qref} 的上限值 i_{q_max} 为：

[0035] $$i_{q_max} = ki_n \quad (2)$$

[0036] 其中，$k > 1.05$，i_n 为光伏并网逆变器的额定电流；

[0037] 所述无功电流指令值 i_{qref} 的下限值 i_{q_min} 的计算公式为：

[0038] $$\begin{cases} i_q_min = 0 & h > 0.9 \\ i_q_min = 1.5(0.9-h)i_n & 0.2 \le h \le 0.9 \\ i_q_min = 1.05i_n & h < 0.2 \end{cases} \quad (3)$$

[0039] 其中，i_n 为光伏并网逆变器的额定电流；

[0040] 优选的，所述有功电流计算单元输出的有功电流指令值 i_{dref} 的计算公式为：

[0041] $$i_{dref} = min\{\sqrt{(i_{max})^2 - i_{qref}^{\ 2}}, i_d^*\} \quad (4)$$

[0042] 其中，i_{max} 为光伏并网逆变器能够承受的最大电流，i_{qref} 为自适应控制器输出的无功电流指令值 i_{qref}，i_d^* 为电网故障时刻采集到的并网电流内环控制的电流指令值。

[0043] 与最接近的现有技术相比，本发明的优异效果是：

[0044] 1、本发明提供的一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，检测到电网电压跌落后，控制策略快速切换，保证光伏并网；

[0045] 2、本发明提供的一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，在故障期间，能够消除并网电流负序分量，光伏逆变器向电网输送三相对称的电流；

[0046] 3、本发明提供的一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，在电网电压故障时，尤其是不对称故障条件下，电网电压、电流均存在负序分量，且负序分量在 dq 正序旋转坐标系下表现为 100Hz 正弦量，若电流内环依旧采用 PI 控制器，负序分量存在较大的稳态误差，不能被控制为零，因此将 PI 与 PR 控制器结合起来，采用 PIR 控制器实现对直流量与 100Hz 交流量的无静差控制；

[0047] 4、本发明提供的一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，采用 PIR 控制器，减少电流正负序分量产生的延时，加快系统的暂态响应，控制策略切换时并网电流无冲击，能够平滑过渡；

[0048] 5、本发明提供的一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，电压外环采用自适应比例调节器，能够在 30ms 内向电网发送动态无功电流支撑，满足新国标 GB/T 19964-2012《光伏发电站接入电力系统技术规定》要求；

[0049] 6、本发明提供的一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法，在电网电压恢复正常时，通过将锁存的直流母线直流电压指令值赋值给最大功率点跟踪参考电压，加快 MPPT 的跟踪速度，提高母线电压调节的动、静态性能。

附图说明

[0050] 下面结合附图对本发明进一步说明。

[0051] 图 1：本发明实施例中电网电压正常时光伏并网逆变器的控制策略框图；

[0052] 图 2：本发明实施例中电网电压故障时光伏并网逆变器的控制策略框图；

[0053] 图 3：本发明实施例中光伏并网逆变器故障穿越控制流程图；

[0054] 图 4 :本发明实施例中三相电网电压跌落至 0％额定电压时 A 相、B 相和 C 相的电压波形图 ;

[0055] 图 5 :本发明实施例中三相电网电压跌落至 0％额定电压时 A 相、B 相和 C 相的电流波形图 ;

[0056] 图 6 :本发明实施例中三相电网电压跌落至 0％额定电压故障发生与恢复时 A 相、B 相和 C 相暂态电压波形图 ;

[0057] 图 7 :本发明实施例中三相电网电压跌落至 0％额定电压故障发生与恢复时 A 相、B 相和 C 相暂态电流波形图 ;

[0058] 图 8 :本发明实施例中光伏并网逆变器拓扑结构图。

具体实施方式

[0059] 下面详细描述本发明的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

[0060] 本发明提供的一种光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法为光伏并网逆变器低电压故障穿越期间自适应动态无功补偿方法，电网电压故障期间，采用电网电压外环电流内环控制策略，电网电压外环基于电网电压正序分量跌落至额定电压百分比并采用自适应控制器，电流内环采用 PIR 控制器实现并网电流无静差控制。

[0061] 本发明中光伏并网逆变器自适应动态无功补偿方法的实施例如图 3 所示，具体为 :

[0062] 1、电网正常运行时，光伏并网逆变器对电网进行电压电流双环控制，该电压电流双环控制包括直流电压外环控制和并网电流内环控制。

[0063] 如图 1 所示，直流电压外环控制的控制电路包括 MPPT 控制器和抗饱和 PI 控制器 ; 并网电流内环控制的控制电路包括第一 PI 控制器、第二 PI 控制器、信号变换单元和 SVPWM 调制器，其中 :

[0064] (1)MPPT 控制器和抗饱和 PI 控制器的逻辑连接关系为 :

[0065] 该 MPPT 控制器的输入端接入电网中光伏发电单元 PV 与并网光伏逆变器之间，输出端与抗饱和 PI 控制器连接。MPPT 控制器与抗饱和 PI 控制器之间连接有第一加法器。

[0066] 第一加法器的输入信号包括 MPPT 控制器输出的直流电压指令值V_{dc}^{*}和光伏发电单元输出的电压值 V_{dc}，第一加法器的输出信号为电压值$V_1 = V_{dc} - V_{dc}^{*}$。

[0067] (2) 抗饱和 PI 控制器和第一 PI 控制器的逻辑连接关系为 :

[0068] 抗饱和 PI 控制器的输出端依次通过第一 PI 控制器、信号变换单元和 SVPWM 调制器接入并网光伏逆变器。抗饱和 PI 控制器与第一 PI 控制器之间连接有第二加法器。

[0069] 第二加法器的输入信号包括抗饱和 PI 控制器输出的有功电流指令值i_d^{*}和电网中输电线路流过的有功电流值 i_d，第二加法器的输出信号为电流值$i_2 = i_d^{*} - i_d$。

[0070] (3) 第一 PI 控制器、第二 PI 控制器、信号变换单元和 SVPWM 调制器的逻辑连接关系为 :

[0071] ①:第一 PI 控制器与信号变换单元之间连接有第三加法器;

[0072] 第三加法器的输入信号包括第一PI控制器的输出信号和电流值 ωi_q,第三加法器的输出信号为第一 PI 控制器的输出信号与电流值 ωi_q的差值。

[0073] ②:第二 PI 控制器的输入端与第四加法器连接,输出端依次通过第五加法器、信号变换单元和 SVPWM 调制器接入并网光伏逆变器。

[0074] 此时第四加法器的输入信号包括无功电流指令值i_q^*和电网中输电线路流过的无功电流值 i_q,第四加法器的输出信号为$i_4 = i_q^* - i_q$;第五加法器的输入信号包括第二 PI 控制器的输出信号和电流值 ωi_d,第五加法器的输出信号为第二PI 控制器的输出信号与电流值 ωi_d的差值;

[0075] 其中,ω 为电网电压角频率,i_q^*依据直流电压外环控制中抗饱和 PI 控制器输出的有功电流指令值i_d^*计算得到。

[0076] 本发明实施例中信号变换单元为 dq/α β 变换单元,接收第一 PI 控制器的输出信号和第二 PI 控制器的输出信号,并将上述输出信号均由 dq 坐标系信号变换为 α β 坐标系信号。

[0077] 2、采集电网发生故障时直流电压外环控制的直流电压指令值V_{dc}^*和并网电流内环控制的 电流指令i_d^*值。

[0078] 3、断开直流电压外环控制。

[0079] 4、构建电网电压外环控制的控制电路,以向并网电流内环控制输出有功电流指令 i_{dref}。

[0080] 同时,电网电压外环控制和并网电流内环控制组成新的电压电流双环控制,即电网故障时的电压电流双环控制,向光伏并网逆变器输出三相调制信号,驱动光伏并网逆变器工作。

[0081] 如图 2 所示,电网电压外环控制的控制电路包括依次连接的锁相环、电压正负序分离单元、自适应控制器、第一 PIR 控制器和第二 PIR 控制器,其中:

[0082] (1) 锁相环

[0083] 该锁相环的输入端接入电网输电线路,用于获取三相电网电压的正序相角 θ,并正序相角 θ 发送到电压正负序分离单元中。

[0084] (2) 电压正负序分离单元、自适应控制器第一PIR控制器和第二PIR控制器的逻辑连接关系为:

[0085] 该电压正负序分离单元与自适应控制器之间连接有第六加法器;自适应控制器的一个输出端通过第七加法器与第一 PIR 控制器连接,另一个输出端通过有功电流计算单元与第八加法器连接;第八加法器的输出端与第二 PIR 控制器连接。

[0086] ①:第六加法器的输入信号包括电压正负序分离单元输出的电网电压正序分量u_d^+和 dq 坐标系下电网电压额定值的 d 轴分量 u_{dn},第六加法器的输出信号为$u_6 = u_d^+ - u_{dn}$;

[0087] ②:第七加法器的输入信号包括自适应控制器输出的无功电流指令值 i_{qref}和电网中输电线路流过的无功电流值 i_q,第七加法器的输出信号为 $i_7 = i_{qref} - i_q$;

[0088] ③:此时第八加法器的输入信号包括有功电流计算单元输出的有功电流指令值 i_{dref}和电网中输电线路流过的有功电流值 i_d,第八加法器的输出信号为 $i_8 = i_{dref} - i_d$。

[0089] 本实施例中三相电网电压 u_a、u_b和 u_c经过正序锁相环锁相后得到正序相角 θ,再经过 Park 变换、Clark 变换和电压正负序分离得到电网电压正序分量u_d^+, u_d^+与 dq 坐标系下电网电压额定值的 d 轴分量 u_{dn}比较后的误差经过自适应控制器得到无功电流指令 i_{qref}。

[0090] (3) 第一 PIR 控制器

[0091] 第一 PIR 控制器和第二 PIR 控制器的输出端均依次通过信号变换单元和 SVPWM 调制器 接入并网光伏逆变器。

[0092] 本实施例中信号变换单元为 dq/α β 变换单元,接收第一 PIR 控制器的输出信号和第二 PIR 控制器的输出信号,并将上述输出信号由 dq 坐标系信号变换为 α β 坐标系信号。第一 PIR 控制器和第二 PIR 控制器输出的 α β 坐标系下的两相调制信号经过坐标变换后得到 α β 坐标系下的调制信号,SVPWM 调制器对信号变换单元输出的调制信号进行计算得到三相调制波,驱动光伏并网逆变器工作。

[0093] (4) 自适应控制器

[0094] 本实施例中自适应控制器采用 P 控制器,其控制参数 K_p的计算公式为:

[0095] $$K_p \geq \frac{1.5\times(0.9-h)}{u_{dn}\times(1-h)} i_n \qquad (1)$$

[0096] 其中,h 为电网电压正序分量u_d^+跌落至电网电压额定值的百分比;u_{dn}为 dq 坐标系下电网电压额定值的 d 轴分量,i_n为光伏并网逆变器的额定电流。

[0097] 本实施例中光伏并网逆变器能够承受的最大电流有限,需要对电网电压外环的输出加入自适应的限幅调解,保证电网电压跌落时光伏并网逆变器输出的无功电流既能够满足标准要求,又不损坏光伏并网逆变器。自适应控制器输出的无功电流指令值 i_{qref}的上限值 i_q_max 为:

[0098] $$i_q_max = k i_n \qquad (2)$$

[0099] 其中,k 依据光伏并网逆变器能够承受的最大电流设置,k > 1.05,本实施例中此处选取 k = 1.08,i_n为光伏并网逆变器的额定电流。

[0100] 所述无功电流指令值 i_{qref}的下限值 i_q_min 的计算公式为:

[0101] $$\begin{cases} i_q_min = 0 & h > 0.9 \\ i_q_min = 1.5(0.9-h) i_n & 0.2 \leq h \leq 0.9 \\ i_q_min = 1.05 i_n & h < 0.2 \end{cases} \qquad (3)$$

[0102] 其中,i_n为光伏并网逆变器的额定电流。

[0103] (5) 有功电流计算单元

[0104] 本实施例中有功电流计算单元输出的无功电流指令值 i_{dref}的计算公式为:

[0105] $$i_{dref} = min\{\sqrt{i_{max}^2 - i_{qref}^2}, i_d^*\} \qquad (4)$$

[0106] 其中,i_n为光伏并网逆变器的额定电流,i_{max}为光伏并网逆变器能够承受的最大电流,取值为 $1.1i_n$, i_{qref}为自适应控制器输出的无功电流指令值, i_d^*为电网故障时刻记录的

并网电流内环控制的电流指令值。

[0107] 5、当电网电压在预置时间内恢复正常后，断开电网电压外环控制。

[0108] 6、将在步骤 1 中存储的直流电压指令值V_{dc}^{*}赋值到直流电压外环控制中 MPPT 控制器的参考电压，光伏并网逆变器并重新对电网进行直流电压外环控制和并网电流内环控制，即采用电网正常时的电压电流双环控制。将直流电压指令值V_{dc}^{*}赋值到 MPPT 控制器，可以加快 MPPT 控制器的跟踪速度，提高母线电压调节的动态性能。

[0109] 本发明中图 8 所示光伏并网逆变器进行低电压故障器件自适应动态无功补偿的过程为：

[0110] 该光伏并网逆变器的具体参数包括：

[0111] ①：额定容量为 500kVA，光伏阵列开路电压 U_{oc} = 910V，短路电流 I_{sc} = 789.36A，最大功率点电压 U_m = 720V，最大功率点电流 I_m = 710.4A；

[0112] ②：直流侧电容为 13200 μF；

[0113] ③：功率器件为 IGBT，开关频率为 4.5kHz；

[0114] ④：输出滤波电感 200uH，滤波电容 200 μH；

[0115] ⑤：直流母线电压抗饱和 PI 控制器比例系数 K'_p = 3，积分系数 K_i = 1300，反向积分系数 K'_i = 1300；电流内环 PI 控制器比例系数 K''_p = 3，积分系数 K''_i = 300，电网电压跌落故障期间电流环 PIR 控制器比例系数 K_p = 3，积分系数 K'''_i = 300，谐振系数 K_r = 300，谐振频率 ω = 628rad/s。

[0116] 电网电压正常时其电压电流波形分别如图 4 和 5 所示，光伏并网逆变器采用如图 1 所示的电压电流双环控制策略，当检测到电网电压发生跌落故障发生后，如图 6 所示，记录此时直流电压外环控制的直流电压指令值V_{dc}^{*}和并网电流内环控制的电流指令i_d^{*}值，切断直流电压外环，采用如图 2 所示控制策略，具体为：

[0117] (1) 将三相电网电压 u_a、u_b和 u_c经过正序锁相环锁相后得到正序相角 θ，再经过 Park 变 换、Clark 变换和电压正负序分离得到电网电压正序分量u_d^{+}和u_q^{+}，此时$u_q^{+}=0$，u_d^{+}与电网电压额定值轴分量 u_{dn}比较后的误差经过自适应控制器得到无功电流指令 i_{qref}，无功电流指令 i_{dref}依据式 (4) 计算得到。

[0118] (2) 依据式 (1) ～ (3) 设置自适应控制器的相关参数，本实施例中电网电压发生三相故障，跌落深度 h = 0%。

[0119] (3) 第一 PIR 控制器和第二 PIR 控制器输出的 α β 坐标系下的两相调制信号经过坐标变换后得到 α β 坐标系下的调制信号，SVPWM 调制器对信号变换单元输出的调制信号进行计算得到三相调制波，驱动光伏并网逆变器工作。

[0120] (4) 当电网电压在预置时间内恢复正常后，如图 7 所示，断开电网电压外环控制。将直流电压指令值V_{dc}^{*}赋值到 MPPT 控制器的参考电压，光伏并网逆变器并重新对电网进行直流电压外环控制和并网电流内环控制。

[0121] 最后应当说明的是：所描述的实施例仅是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

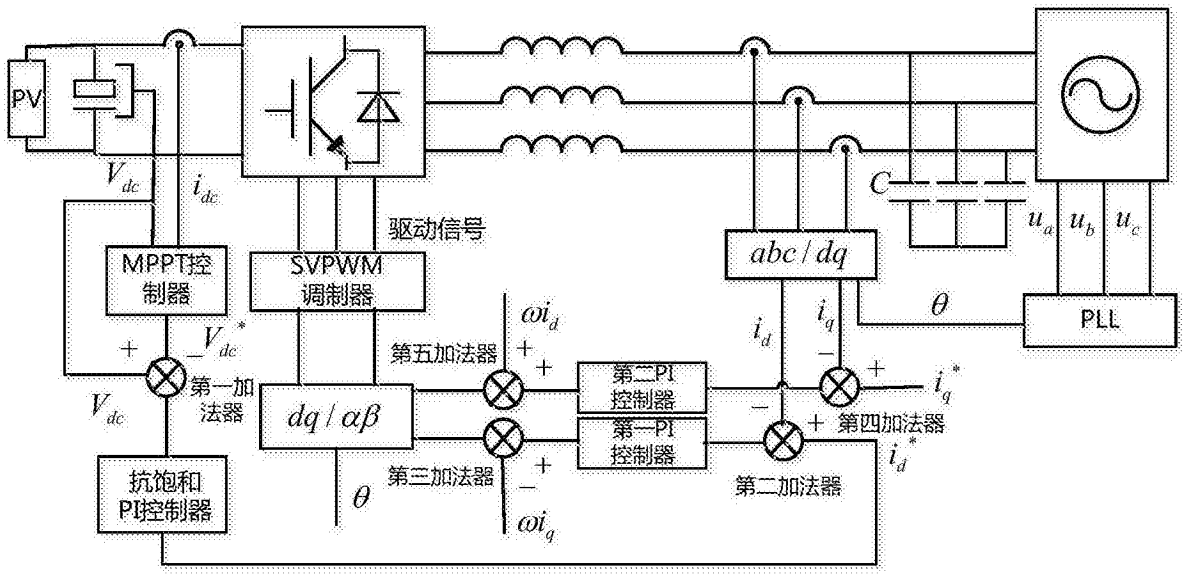

PV
V_{dc}
i_{dc}
驱动信号
MPPT控制器
SVPWM调制器
V_{dc}^*
第一加法器
$dq/\alpha\beta$
抗饱和PI控制器
θ
ωi_d
第五加法器
第二PI控制器
第一PI控制器
第三加法器
ωi_q
abc/dq
i_d
i_q
第四加法器
i_q^*
i_d^*
第二加法器
C
u_a u_b u_c
PLL

图 1

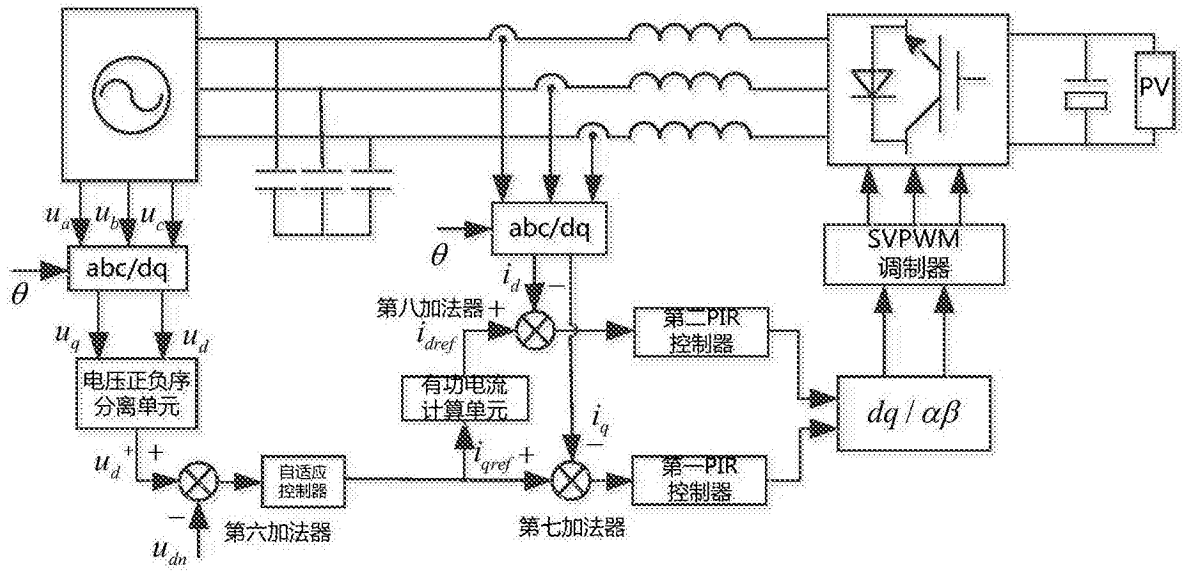

PV
u_a u_b u_c
abc/dq
θ
u_q u_d
电压正负序分离单元
u_d^+
自适应控制器
第六加法器
u_{dn}
i_d
第八加法器
i_{dref}
有功电流计算单元
i_{qref}
第七加法器
i_q
第二PIR控制器
第一PIR控制器
SVPWM调制器
$dq/\alpha\beta$

图 2

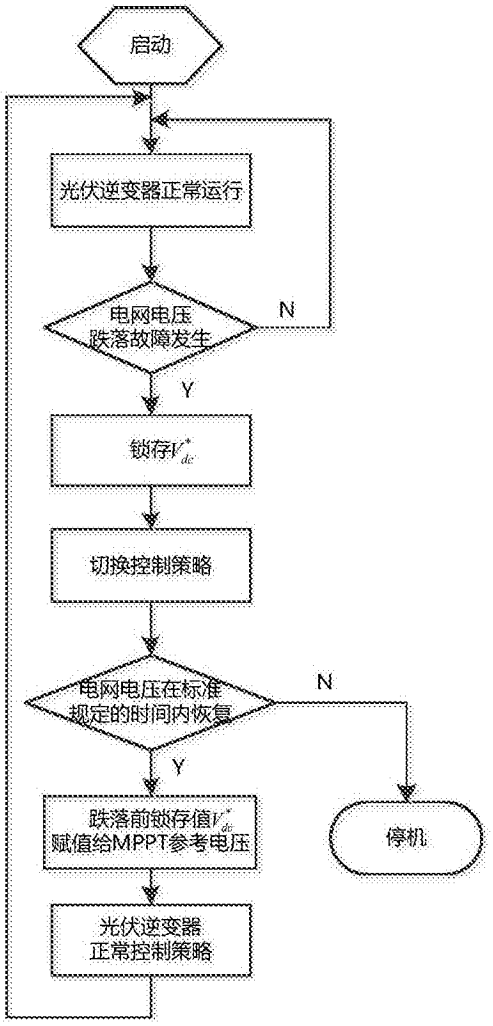

启动
光伏逆变器正常运行
电网电压
跌落故障发生
N
Y
锁存V_{dc}^*
切换控制策略
电网电压在标准
规定的时间内恢复
N
Y
跌落前锁存值V_{dc}^*
赋值给MPPT参考电压
停机
光伏逆变器
正常控制策略

图 3

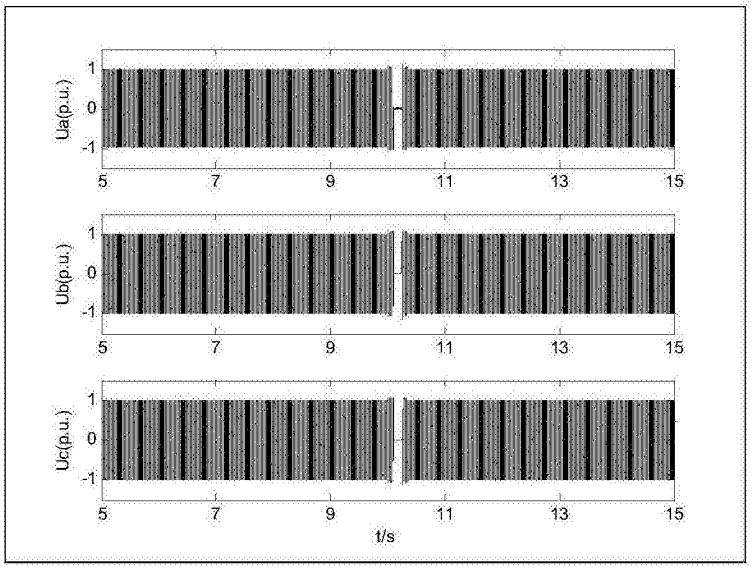

Ua(p.u.)
Ub(p.u.)
Uc(p.u.)
1
0
-1
5
7
9
11
13
15
t/s

图 4

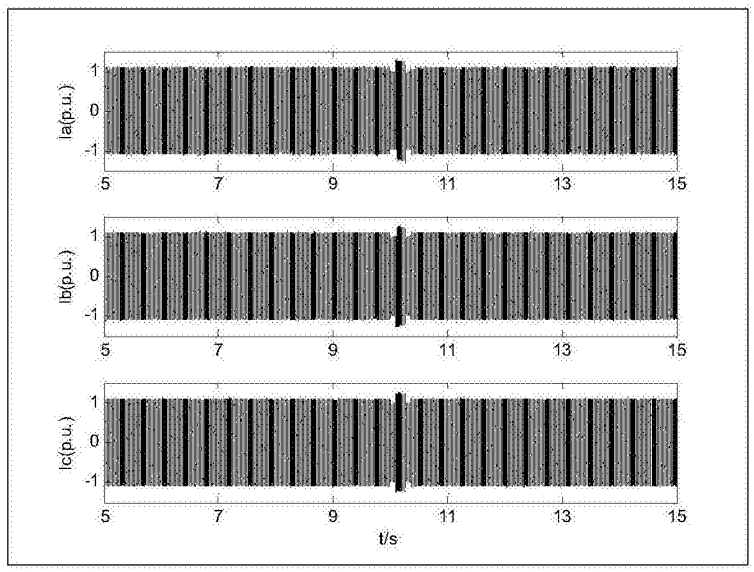

Ia(p.u.)
Ib(p.u.)
Ic(p.u.)
1
0
-1
5
7
9
11
13
15
t/s

图 5

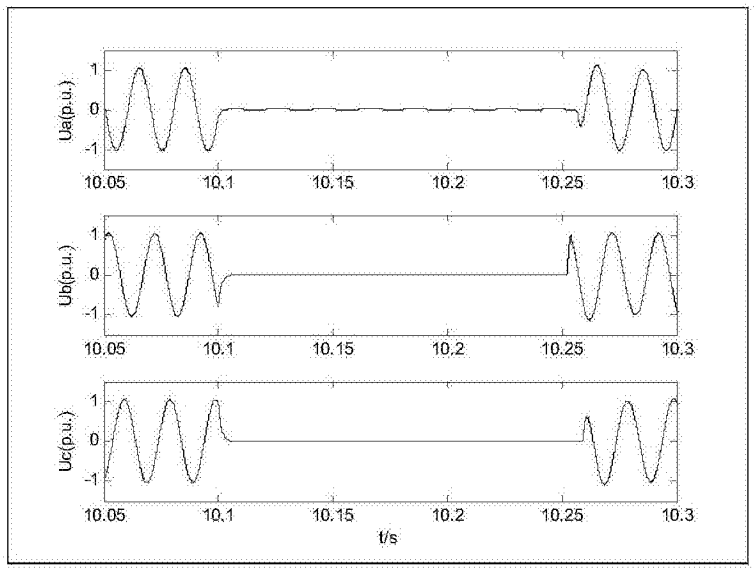

Ua(p.u.)
Ub(p.u.)
Uc(p.u.)
1
0
-1
10.05
10.1
10.15
10.2
10.25
10.3
t/s

图 6

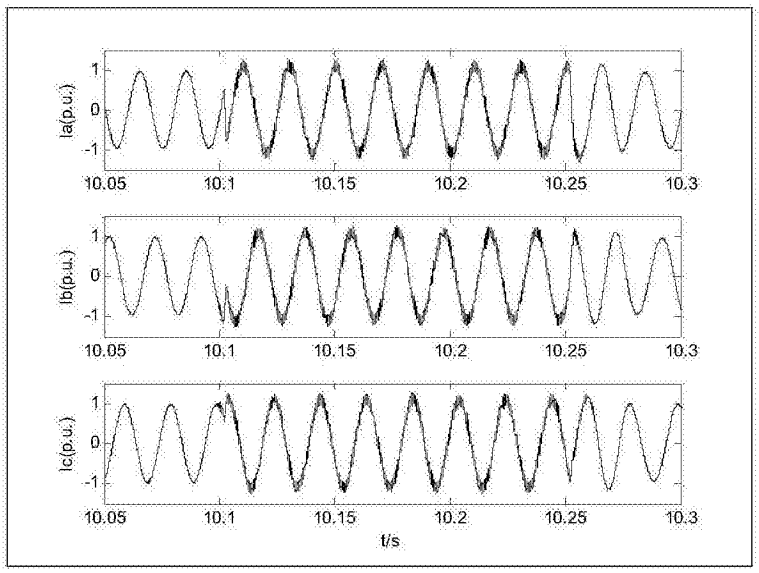

Ia(p.u.)
Ib(p.u.)
Ic(p.u.)
1
0
-1
10.05
10.1
10.15
10.2
10.25
10.3
t/s

图 7

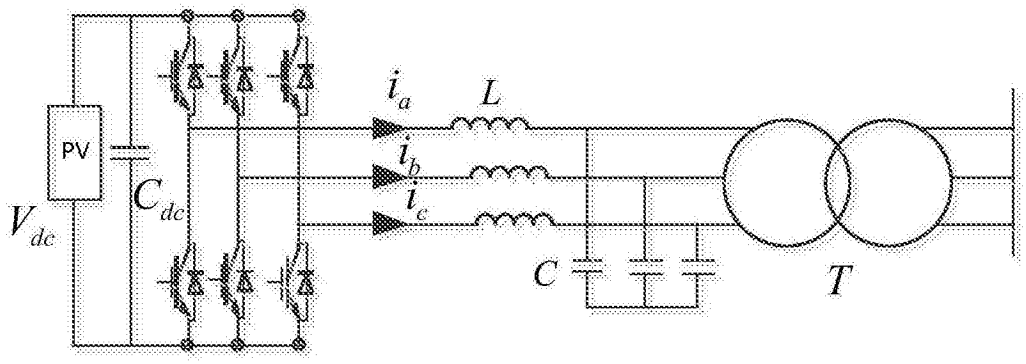

PV
V_{dc}
C_{dc}
i_a
i_b
i_c
L
C
T

图 8