



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111525605 A

(43)申请公布日 2020.08.11

(21)申请号 202010265670.1

(22)申请日 2020.04.07

(71)申请人 北方工业大学

地址 100144 北京市石景山区晋元庄路5号

(72)发明人 李建林 王含 杨林 谭宇良

(74)专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569

代理人 刘凤玲

(51)Int.Cl.

H02J 3/38(2006.01)

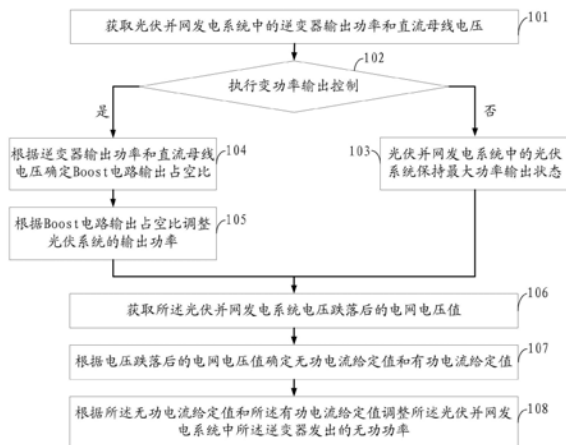
权利要求书3页 说明书12页 附图5页

(54)发明名称

基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法及系统

(57)摘要

本发明公开了一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法及系统。所述方法在电压跌落深度较小时,光伏系统仍可以保持最大功率输出;在电网电压跌落深度较大时,立足于逆变器两侧的功率平衡问题,主动调整光伏系统的输出功率,快速消除因电网故障产生的不平衡功率;并且故障期间根据电压跌落深度的不同,重新进行有功、无功电流值的分配,保证逆变器输出不过流,完成低电压穿越过程。采用本发明方法及系统可以兼顾光伏并网发电系统在电网故障期间的安全稳定运行以及太阳能资源的充分利用,同现有技术相比,更具有优越性。



1. 一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法,其特征在于,所述光伏系统低电压穿越方法包括:

获取光伏并网发电系统中的逆变器输出功率和直流母线电压;所述光伏并网发电系统包括光伏系统、Boost电路、逆变器和电网;

根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压判断是否执行变功率输出控制,获得第一判断结果;

若所述第一判断结果为不执行变功率输出控制,则所述光伏并网发电系统中的所述光伏系统保持最大功率输出状态;

若所述第一判断结果为执行变功率输出控制,则根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比;

根据所述Boost电路输出占空比调整所述光伏系统的输出功率;

获取所述光伏并网发电系统电压跌落后的电网电压值;

根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值;

根据所述无功电流给定值和所述有功电流给定值调整所述光伏并网发电系统中所述逆变器发出的无功功率。

2. 根据权利要求1所述的光伏系统低电压穿越方法,其特征在于,所述根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压判断是否执行变功率输出控制,获得第一判断结果,具体包括:

判断所述逆变器输出功率是否小于或等于故障期间有功功率参考值,获得第二判断结果;

若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率大于故障期间有功功率参考值,确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;

若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率小于或等于故障期间有功功率参考值,则判断所述直流母线电压是否小于或等于设定电压值下限,获得第三判断结果;

若所述第三判断结果为所述直流母线电压小于或等于设定电压值下限,则确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;

若所述第三判断结果为所述直流母线电压大于设定电压值下限且小于设定电压值上限,则确定所述第一判断结果为执行变功率输出控制。

3. 根据权利要求2所述的光伏系统低电压穿越方法,其特征在于,所述根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比,具体包括:

根据所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 和所述直流母线电压 $U_{dc}$ ,采用公式 $I_{dc} = P_{inj} / U_{dc}$ 确定直流母线电流 $I_{dc}$ ;

获取所述光伏系统最大功率点处对应的电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ;

根据所述电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ,采用公式 $I_{pv}^* = P_{PV}^* / (P_M I_M)$ 确定所述光伏系统最大功率点处的电流参考值 $I_{pv}^*$ ;其中 $P_{PV}^*$ 为所述光伏系统最大功率点处的输出功率参考值;

根据所述直流母线电流 $I_{dc}$ 和所述电流参考值 $I_{pv}^*$ ,采用公式 $D = 1 - I_{dc} / I_{pv}^*$ 确定Boost电路输出占空比D。

4. 根据权利要求3所述的光伏系统低电压穿越方法,其特征在于,所述根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值,具体包括:

根据所述电压跌落后的电网电压值 $U$ ,采用方程组

$$\begin{cases} \frac{i_q^*}{i_N} = 0, \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = -2 \frac{U}{U_N} + 2, 0.5 < \frac{U}{U_N} < 0.9 \text{ 确定无功电流给定值 } i_q^*; \text{ 其中 } U_N \text{ 表示电网电压额定} \\ \frac{i_q^*}{i_N} = 1, \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \end{cases}$$

值; $i_N$ 表示逆变器输出电流额定值;

根据所述无功电流给定值 $i_q^*$ ,采用公式 $i_d^* = \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2}$ 确定有功电流给定值 $i_d^*$ 。

5. 一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越系统,其特征在于,所述光伏系统低电压穿越系统包括:

系统参数获取模块,用于获取光伏并网发电系统中的逆变器输出功率和直流母线电压;所述光伏并网发电系统包括光伏系统、Boost电路、逆变器和电网;

变功率输出控制判断模块,用于根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压判断是否执行变功率输出控制,获得第一判断结果;

最大功率输出保持模块,用于若所述第一判断结果为不执行变功率输出控制,则所述光伏并网发电系统中的所述光伏系统保持最大功率输出状态;

占空比计算模块,用于若所述第一判断结果为执行变功率输出控制,则根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比;

输出功率调节模块,用于根据所述Boost电路输出占空比调整所述光伏系统的输出功率;

电网电压值获取模块,用于获取所述光伏并网发电系统电压跌落后的电网电压值;

有功无功电流给定值计算模块,用于根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值;

无功功率调节模块,用于根据所述无功电流给定值和所述有功电流给定值调整所述光伏并网发电系统中所述逆变器发出的无功功率。

6. 根据权利要求5所述的光伏系统低电压穿越系统,其特征在于,所述变功率输出控制判断模块具体包括:

输出功率判断单元,用于判断所述逆变器输出功率是否小于或等于故障期间有功功率参考值,获得第二判断结果;

第一判断结果单元,用于若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率大于故障期间有功功率参考值,确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;

直流母线电压判断单元,用于若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率小于或等于故障期间有功功率参考值,则判断所述直流母线电压是否小于或等于设定电压值下限,获得第三判断结果;

第二判断结果单元,用于若所述第三判断结果为所述直流母线电压小于或等于设定电压值下限,则确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;

第三判断结果单元,用于若所述第三判断结果为所述直流母线电压大于设定电压值下限且小于设定电压值上限,则确定所述第一判断结果为执行变功率输出控制。

7.根据权利要求6所述的光伏系统低电压穿越系统,其特征在于,所述占空比计算模块具体包括:

直流母线电流计算单元,用于根据所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 和所述直流母线电压 $U_{dc}$ ,采用公式 $I_{dc}=P_{inj}/U_{dc}$ 确定直流母线电流 $I_{dc}$ ;

电流功率参数获取单元,用于获取所述光伏系统最大功率点处对应的电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ;

电流参考值计算单元,用于根据所述电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ,采用公式 $I_{pv}^*=P_{PV}^*/(P_M I_M)$ 确定所述光伏系统最大功率点处的电流参考值 $I_{pv}^*$ ;其中 $P_{PV}^*$ 为所述光伏系统最大功率点处的输出功率参考值;

占空比计算单元,用于根据所述直流母线电流 $I_{dc}$ 和所述电流参考值 $I_{pv}^*$ ,采用公式 $D=1-I_{dc}/I_{pv}^*$ 确定Boost电路输出占空比 $D$ 。

8.根据权利要求7所述的光伏系统低电压穿越系统,其特征在于,所述有功无功电流给定值计算模块具体包括:

无功电流给定值计算单元,用于根据所述电压跌落后的电网电压值 $U$ ,采用方程组

$$\begin{cases} \frac{i_q^*}{i_N} = 0, \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = -2 \frac{U}{U_N} + 2, 0.5 < \frac{U}{U_N} < 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = 1, \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \end{cases}$$

确定无功电流给定值 $i_q^*$ ;其中 $U_N$ 表示电网电压额定

值; $i_N$ 表示逆变器输出电流额定值;

有功电流给定值计算单元,用于根据所述无功电流给定值 $i_q^*$ ,采用公式

$$i_d^* = \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2}$$

确定有功电流给定值 $i_d^*$ 。

## 基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及新能源并网发电系统保护与控制技术领域,特别是涉及一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法及系统。

### 背景技术

[0002] 大容量新能源(光伏、风能)并网发电系统的接入给电网的稳定性带来了巨大的挑战。电网故障(电压跌落)期间,大容量并网系统脱网运行造成的瞬时功率切除会对电网造成巨大的冲击。

[0003] 正常工况下通常控制光伏系统工作在最大功率点以充分利用太阳能资源。在电网故障(电网电压跌落)期间,由于逆变器两侧的功率平衡被打破,此时光伏系统如果继续保持最大功率的输出,则累积在直流侧并联电容上的不平衡功率逐渐增加,这会导致直流母线电压急剧升高,到达阈值电压后继电保护装置将断开并网系统与电网的连接,造成光伏并网发电系统的脱网运行。中国国家电网公司起草的并网导则规定了当电网故障导致并网电压跌落时,光伏系统必须要保持不脱网运行,并向电网提供一定的无功功率,以支持电网电压恢复,即实现低电压穿越功能。因此故障期间要调整光伏系统输出,保证因电网故障导致的不平衡功率被快速消除,维持直流母线电压的稳定。

[0004] 现有技术中通常直接利用光伏系统P-U(功率-电压)特性进行功率自调节,或利用外接储能设备的协调控制来消除直流母线上的不平衡功率,但当电压跌落深度较大时,由于不平衡功率的数值较大,短时间内无法满足功率快速消纳的要求,直流母线电压仍会上升至阈值电压,导致保护装置动作将并网系统切除,无法顺利完成低电压穿越过程。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法及系统,以解决电压跌落深度较大时采用现有技术无法顺利完成低电压穿越过程的问题。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0007] 一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法,所述光伏系统低电压穿越方法包括:

[0008] 获取光伏并网发电系统中的逆变器输出功率和直流母线电压;所述光伏并网发电系统包括光伏系统、Boost电路、逆变器和电网;

[0009] 根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压判断是否执行变功率输出控制,获得第一判断结果;

[0010] 若所述第一判断结果为不执行变功率输出控制,则所述光伏并网发电系统中的所述光伏系统保持最大功率输出状态;

[0011] 若所述第一判断结果为执行变功率输出控制,则根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比;

[0012] 根据所述Boost电路输出占空比调整所述光伏系统的输出功率;

- [0013] 获取所述光伏并网发电系统电压跌落后的电网电压值；
- [0014] 根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值；
- [0015] 根据所述无功电流给定值和所述有功电流给定值调整所述光伏并网发电系统中所述逆变器发出的无功功率。
- [0016] 可选的,所述根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压判断是否执行变功率输出控制,获得第一判断结果,具体包括:
- [0017] 判断所述逆变器输出功率是否小于或等于故障期间有功功率参考值,获得第二判断结果;
- [0018] 若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率大于故障期间有功功率参考值,确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;
- [0019] 若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率小于或等于故障期间有功功率参考值,则判断所述直流母线电压是否小于或等于设定电压值下限,获得第三判断结果;
- [0020] 若所述第三判断结果为所述直流母线电压小于或等于设定电压值下限,则确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;
- [0021] 若所述第三判断结果为所述直流母线电压大于设定电压值下限且小于设定电压值上限,则确定所述第一判断结果为执行变功率输出控制。
- [0022] 可选的,所述根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比,具体包括:
- [0023] 根据所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 和所述直流母线电压 $U_{dc}$ ,采用公式 $I_{dc} = P_{inj} / U_{dc}$ 确定直流母线电流 $I_{dc}$ ;
- [0024] 获取所述光伏系统最大功率点处对应的电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ;
- [0025] 根据所述电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ,采用公式 $I_{pv}^* = P_{PV}^* / (P_M I_M)$ 确定所述光伏系统最大功率点处的电流参考值 $I_{pv}^*$ ;其中 $P_{PV}^*$ 为所述光伏系统最大功率点处的输出功率参考值;
- [0026] 根据所述直流母线电流 $I_{dc}$ 和所述电流参考值 $I_{pv}^*$ ,采用公式 $D = 1 - I_{dc} / I_{pv}^*$ 确定Boost电路输出占空比 $D$ 。
- [0027] 可选的,所述根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值,具体包括:
- [0028] 根据所述电压跌落后的电网电压值 $U$ ,采用方程组

$$\begin{cases} \frac{i_q^*}{i_N} = 0, \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = -2 \frac{U}{U_N} + 2, 0.5 < \frac{U}{U_N} < 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = 1, \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \end{cases}$$

值； $i_N$ 表示逆变器输出电流额定值；

[0029] 根据所述无功电流给定值  $i_q^*$ ，采用公式  $i_d^* = \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2}$  确定有功电流给定值  $i_d^*$ 。

[0030] 一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越系统，所述光伏系统低电压穿越系统包括：

[0031] 系统参数获取模块，用于获取光伏并网发电系统中的逆变器输出功率和直流母线电压；所述光伏并网发电系统包括光伏系统、Boost电路、逆变器和电网；

[0032] 变功率输出控制判断模块，用于根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压判断是否执行变功率输出控制，获得第一判断结果；

[0033] 最大功率输出保持模块，用于若所述第一判断结果为不执行变功率输出控制，则所述光伏并网发电系统中的所述光伏系统保持最大功率输出状态；

[0034] 占空比计算模块，用于若所述第一判断结果为执行变功率输出控制，则根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比；

[0035] 输出功率调节模块，用于根据所述Boost电路输出占空比调整所述光伏系统的输出功率；

[0036] 电网电压值获取模块，用于获取所述光伏并网发电系统电压跌落后的电网电压值；

[0037] 有功无功电流给定值计算模块，用于根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值；

[0038] 无功功率调节模块，用于根据所述无功电流给定值和所述有功电流给定值调整所述光伏并网发电系统中所述逆变器发出的无功功率。

[0039] 可选的，所述变功率输出控制判断模块具体包括：

[0040] 输出功率判断单元，用于判断所述逆变器输出功率是否小于或等于故障期间有功功率参考值，获得第二判断结果；

[0041] 第一判断结果单元，用于若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率大于故障期间有功功率参考值，确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制；

[0042] 直流母线电压判断单元，用于若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率小于或等于故障期间有功功率参考值，则判断所述直流母线电压是否小于或等于设定电压值下限，获得第三判断结果；

[0043] 第二判断结果单元,用于若所述第三判断结果为所述直流母线电压小于或等于设定电压值下限,则确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;

[0044] 第三判断结果单元,用于若所述第三判断结果为所述直流母线电压大于设定电压值下限且小于设定电压值上限,则确定所述第一判断结果为执行变功率输出控制。

[0045] 可选的,所述占空比计算模块具体包括:

[0046] 直流母线电流计算单元,用于根据所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 和所述直流母线电压 $U_{dc}$ ,采用公式 $I_{dc}=P_{inj}/U_{dc}$ 确定直流母线电流 $I_{dc}$ ;

[0047] 电流功率参数获取单元,用于获取所述光伏系统最大功率点处对应的电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ;

[0048] 电流参考值计算单元,用于根据所述电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ,采用公式 $I_{pv}^* = P_{PV}^* / (P_M I_M)$ 确定所述光伏系统最大功率点处的电流参考值 $I_{pv}^*$ ;其中 $P_{PV}^*$ 为所述光伏系统最大功率点处的输出功率参考值;

[0049] 占空比计算单元,用于根据所述直流母线电流 $I_{dc}$ 和所述电流参考值 $I_{pv}^*$ ,采用公式 $D = 1 - I_{dc} / I_{pv}^*$ 确定Boost电路输出占空比 $D$ 。

[0050] 可选的,所述有功无功电流给定值计算模块具体包括:

[0051] 无功电流给定值计算单元,用于根据所述电压跌落后的电网电压值 $U$ ,采用方程组

$$\begin{cases} \frac{i_q^*}{i_N} = 0, \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = -2 \frac{U}{U_N} + 2, 0.5 < \frac{U}{U_N} < 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = 1, \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \end{cases} \text{确定无功电流给定值 } i_q^*; \text{其中 } U_N \text{ 表示电网电压额定}$$

值; $i_N$ 表示逆变器输出电流额定值;

[0052] 有功电流给定值计算单元,用于根据所述无功电流给定值 $i_q^*$ ,采用公式

$$i_d^* = \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2} \text{ 确定有功电流给定值 } i_d^*。$$

[0053] 根据本发明提供的具体实施例,本发明公开了以下技术效果:

[0054] 本发明提供一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法及系统,所述方法首先根据光伏并网发电系统中的逆变器输出功率和直流母线电压判断是否执行变功率输出控制,若不执行变功率输出控制,则光伏系统保持最大功率输出状态;若执行变功率输出控制,则根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比,根据所述Boost电路输出占空比调整所述光伏系统的输出功率;同时获取所述光伏并网发电系统电压跌落后的电网电压值并计算无功电流给定值和有功电流给定值;根据所述无功电流给定值和所述有功电流给定值调整所述光伏并网发电系统中所述逆变器发出的无功功率。



本发明方法在电压跌落深度较小时,光伏系统仍可以保持最大功率输出;在电网电压跌落深度较大时,立足于逆变器两侧的功率平衡问题,主动调整光伏系统的输出功率,快速消除因电网故障产生的不平衡功率;并且故障期间根据电压跌落深度的不同,重新进行有功、无功电流值的分配,保证逆变器输出不过流,完成低电压穿越过程。采用本发明方法及系统可以兼顾光伏并网发电系统在电网故障期间的安全稳定运行以及太阳能资源的充分利用,同现有技术相比,更具有优越性。

## 附图说明

[0055] 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,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0056] 图1为本发明提供的基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法的流程图;

[0057] 图2为本发明提供的基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法的原理图;

[0058] 图3为本发明提供的两级式光伏并网发电系统的结构图;

[0059] 图4为本发明提供的基于滞环控制的电压分层方式示意图;

[0060] 图5为本发明提供的模式切换的控制原理图;

[0061] 图6为本发明提供的逆变器控制结构图;

[0062] 图7为本发明提供的基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法的仿真结果示意图;图7(a)为光伏系统输出功率示意图;图7(b)为直流母线电压示意图;图7(c)为逆变器输出有功功率示意图;图7(d)为逆变器输出无功功率示意图。

## 具体实施方式

[0063] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,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,都属于本发明保护的范围。

[0064] 本发明的目的是提供一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法及系统,以解决电压跌落深度较大时采用现有技术无法顺利完成低电压穿越过程的问题。

[0065] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0066] 图1为本发明提供的基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法的流程图;图2为本发明提供的基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法的原理图。参见图1和图2,本发明提供的基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法具体包括:

[0067] 步骤101:获取光伏并网发电系统中的逆变器输出功率和直流母线电压。

[0068] 本发明方法应用于现有的光伏并网发电系统,所述光伏并网发电系统包括光伏系统、Boost电路、逆变器和电网。图3为本发明提供的两级式光伏并网发电系统的结构图。如图3所示,一个完整的两级三相光伏并网发电系统包括光伏系统、Boost电路、逆变器和电网等部分。其中所述光伏系统右侧连接Boost电路,Boost电路右侧连接逆变器,逆变器输出与

电网连接。Boost电路控制光伏电池的输出功率并将电压升到一个合适的数值,经逆变器逆变后并入电网。

[0069] 图3中,光伏系统与Boost电路相连,由于光伏系统自身输出电压数值较小,无法满足并网发电系统的要求,因此光伏系统通过Boost电路升压,并通过Boost电路完成最大功率点跟踪(Max PowerPoint Tracking,MPPT)。Boost电路经直流母线与逆变器连接,通过逆变器逆变作用进行并网。图3中 $C_{pv}$ 为光伏侧并联电容; $D$ 为Boost电路输出占空比; $C_{dc}$ 为直流侧滤波电容, $U_{dc}$ 为直流母线电压。 $T_1\sim T_6$ 为组成逆变器的6个开关管元件。 $i_a、i_b、i_c$ 为逆变器输出三相电流, $u_a、u_b、u_c$ 为逆变器输出三相电压, $e_a、e_b、e_c$ 为电网三相电压。 $L$ 为滤波电感。

[0070] 本发明对逆变器输出功率 $P_{inj}$ 进行采样,比较故障期间有功功率参考值 $P^*$ 和 $P_{inj}$ 的大小,若 $P_{inj}>P^*$ ,光伏系统保持最大功率输出状态;若 $P_{inj}\leq P^*$ ,则利用滞环控制的原理设置两个阈值电压 $U_1、U_2$ ,采样直流母线电压 $U_{dc}$ 数值,当 $U_{dc}\leq U_1$ 时,执行光伏系统保持最大功率输出状态,否则执行变功率输出控制,即执行步骤104。

[0071] 步骤102:根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压判断是否执行变功率输出控制,获得第一判断结果。

[0072] 图4为本发明提供的基于滞环控制的电压分层方式示意图,图4横坐标表示直流母线电压数值,纵坐标表示控制方式。图4中 $U_1$ 为设定电压值下限, $U_2$ 为设定电压值上限。如图4所示,当由于电网故障产生的不平衡功率使直流母线电压 $U_{dc}$ 上升时,当 $U_{dc}\leq U_1$ 时,光伏系统保持最大功率输出,通过Boost电路完成MPPT;当 $U_1<U_{dc}<U_2$ 时,切换为变功率输出控制(简称变功率控制),防止故障期间直流母线电压 $U_{dc}$ 上升至阈值电压 $U_0$ 。

[0073] 因此,所述步骤102具体包括:

[0074] 判断所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 是否小于或等于故障期间有功功率参考值 $P^*$ ,获得第二判断结果;

[0075] 若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 大于故障期间有功功率参考值 $P^*$ ,确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;此时执行步骤103,所述光伏并网发电系统中的所述光伏系统保持最大功率输出状态;

[0076] 若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 小于或等于故障期间有功功率参考值 $P^*$ ,则判断所述直流母线电压 $U_{dc}$ 是否小于或等于设定电压值下限 $U_1$ ,获得第三判断结果;

[0077] 若所述第三判断结果为所述直流母线电压 $U_{dc}$ 小于或等于设定电压值下限 $U_1$ ,则确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;此时执行步骤103,所述光伏并网发电系统中的所述光伏系统保持最大功率输出状态;

[0078] 若所述第三判断结果为所述直流母线电压 $U_{dc}$ 大于设定电压值下限 $U_1$ 且小于设定电压值上限 $U_2$ ,则确定所述第一判断结果为执行变功率输出控制;此时执行步骤104,根据所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 和所述直流母线电压 $U_{dc}$ 确定Boost电路输出占空比 $D$ 。

[0079] 步骤103:若所述第一判断结果为不执行变功率输出控制,则所述光伏并网发电系统中的所述光伏系统保持最大功率输出状态。

[0080] 步骤104:若所述第一判断结果为执行变功率输出控制,则根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比。

[0081] 图5为本发明提供的模式切换的控制原理图。如图5所示,本发明根据电压分层结

果执行不同的控制策略,例如当 $U_{dc} \leq U_1$ 时,光伏系统保持最大功率输出,通过Boost电路完成光伏系统MPPT控制;当 $U_1 < U_{dc} < U_2$ 时,切换为变功率控制,通过改变Boost电路输出占空比D来实现光伏系统输出功率的调整。由Boost电路工作原理及功率守恒方程得到输出电路占空比D的表达式为:

$$[0082] \quad \begin{cases} D = 1 - I_{dc} / I_{PV}^* \\ I_{pv}^* = P_{PV}^* / (P_M I_M) \\ I_{dc} = P_{inj} / U_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

[0083] 式(1)中D为Boost电路输出占空比, $I_{dc}$ 、 $U_{dc}$ 分别为直流母线电流和电压值。

$I_{pv}^*$ 、 $P_{PV}^*$ 分别为光伏系统最大功率点电流和功率的标准值,即光伏系统最大功率点处的电流和输出功率参考值。 $I_M$ 、 $P_M$ 分别为光伏系统最大功率点处对应的电流、功率值,即光伏系统最大功率输出时电流、功率的实际采样值。 $P_{inj}$ 为逆变器输出功率。

[0084] 因此,所述步骤104根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比,具体包括:

[0085] 根据所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 和所述直流母线电压 $U_{dc}$ ,采用公式 $I_{dc} = P_{inj} / U_{dc}$ 确定直流母线电流 $I_{dc}$ ;

[0086] 获取所述光伏系统最大功率点处对应的电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ;

[0087] 根据所述电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ,采用公式 $I_{pv}^* = P_{PV}^* / (P_M I_M)$ 确定所述光伏系统最大功率点处的电流参考值 $I_{pv}^*$ ;其中 $P_{PV}^*$ 为所述光伏系统最大功率点处的输出功率参考值;

[0088] 根据所述直流母线电流 $I_{dc}$ 和所述电流参考值 $I_{pv}^*$ ,采用公式 $D = 1 - I_{dc} / I_{PV}^*$ 确定Boost电路输出占空比D。

[0089] 步骤105:根据所述Boost电路输出占空比调整所述光伏系统的输出功率。

[0090] 计算出的占空比D施加在图3中Boost电路的开关管上,通过调节占空比D改变光伏系统的输出功率。

[0091] 本发明通过在故障期间对光伏系统的功率输出进行调节,实时改变光伏系统输出功率,从而将功率点追踪的目标由最大功率点变为更有助于实现低电压穿越的最佳功率点,主动地减少光伏电池发出的能量,从源头上减少了多余能量的产生,进而快速有效地控制光伏电池功率的输出,实现逆变器两侧功率的平衡,避免了直流母线过电压和并网电流过流。

[0092] 步骤106:获取所述光伏并网发电系统电压跌落后的电网电压值。

[0093] 图6为本发明提供的逆变器控制结构图。图6为所述光伏并网发电系统中逆变器的经典双闭环控制方式。其中 $i_q$ 为逆变器输出电流的q轴分量采样值,也表示为无功电流的采样值; $i_d$ 为逆变器输出电流的d轴分量采样值。 $i_q^*$ 、 $i_d^*$ 分别表示无功电流给定值和有功电

流给定值。 $e_d$ 、 $e_q$ 分别为电网电压的d、q分量， $\omega$ 为电网角频率， $L$ 为滤波电感。 $U_d$ 、 $U_q$ 分别为得到的控制参考电压的d、q分量，同理 $U_\alpha$ 、 $U_\beta$ 分别为得到的控制参考电压的 $\alpha$ 、 $\beta$ 分量。SVPWM (SpaceVectorPulseWidthModulation)为逆变器的空间矢量调制方式。

[0094] 为了实现故障期间逆变器的空间矢量调制，本发明首先获取所述光伏并网发电系统电压跌落后的电网电压值 $U$ 。

[0095] 步骤107：根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值。

[0096] 故障期间，逆变器要发出一定量的无功功率支撑电网电压的恢复，此时无功电流的给定值 $i_q^*$ 为：

$$[0097] \quad \begin{cases} \frac{i_q^*}{i_N} = 0, \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = -2 \frac{U}{U_N} + 2, 0.5 < \frac{U}{U_N} < 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = 1, \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

[0098] 公式(2)中 $i_q^*$ 为逆变器输出电流的q轴分量，由瞬时功率理论得 $i_q^*$ 可以表示为无功电流给定值。 $i_N$ 为逆变器输出电流的额定值，为技术铭牌参数。 $U$ 为电网电压跌落后的实际测量值，即电压跌落后的电网电压值。 $U_N$ 表示电网电压额定值，一般为380V。 $U/U_N$ 即表示电网电压跌落深度。 $i_q^*$ 是跟据实际并网功率要求和容量计算得到的。

[0099] 为了防止逆变器输出过流，即不超过额定电流值的1.1倍，因此得到故障期间所需有功电流给定值 $i_d^*$ 为：

$$[0100] \quad i_d^* = \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2} \quad (3)$$

[0101] 因此，所述步骤107根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值，具体包括：

[0102] 根据所述电压跌落后的电网电压值 $U$ ，采用方程组

$$\begin{cases} \frac{i_q^*}{i_N} = 0, \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = -2\frac{U}{U_N} + 2, 0.5 < \frac{U}{U_N} < 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = 1, \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \end{cases}$$

值;  $i_N$ 表示逆变器输出电流额定值;

[0103] 根据所述无功电流给定值  $i_q^*$ , 采用公式  $i_d^* = \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2}$  确定有功电流给定值  $i_d^*$ 。

[0104] 有功电流给定值  $i_d^*$  和无功电流给定值  $i_q^*$  这两个数值都是作为逆变器控制策略中的外环电流控制给定值。本发明通过实现光伏系统输出功率的自适应调整来完成低电压穿越过程, 而低电压穿越过程的核心是对逆变器的控制。

[0105] 步骤108: 根据所述无功电流给定值和所述有功电流给定值调整所述光伏并网发电系统中所述逆变器发出的无功功率。

[0106] 如图6可见, 故障期间逆变器采用单环控制模式, 故障期间有功、无功电流参考值  $i_d^*$  和  $i_q^*$  按照步骤107中所述方法进行计算, 从而控制逆变器根据有功、无功电流参考值  $i_d^*$  和  $i_q^*$  发出一定量的无功功率支撑电网电压的恢复。

[0107] 本发明通过并网逆变器的控制, 在保证并网输出电流不越限的前提下, 为电网提供尽可能多的有功功率和无功功率, 最大限度地支持电网电压的恢复。

[0108] 采用本发明方法, 当电网故障时, 为了实现功率平衡和太阳能资源利用的最大化, 当电压跌落深度较小 (小于30%) 时, 光伏系统仍可以保持最大功率输出。当电压跌落深度较大 (大于50%) 时, 由于直流侧电容累积的不平衡功率较大, 无法在短时间内实现不平衡功率的消除, 因此通过滞环控制的原理设置两个阈值电压来实现两种控制模式的切换, 进而实现不平衡功率的快速消除, 完成低电压穿越过程。其中光伏系统变功率控制是通过改变Boost电路占空比D实现的, 步骤104给出了计算占空比D的方法。步骤104实施的目的是为了实现在光伏系统输出功率的调整, 步骤107是计算控制电流指令的给定值, 步骤105和步骤108的控制对象分别为光伏系统和逆变器。本发明的有益效果是解决了电压跌落深度较大时的电网故障工况下的功率不平衡问题, 考虑到直流母线电压的稳定以及太阳能资源的充分利用, 在电压跌落深度较小时, 光伏系统仍可以保持最大功率输出; 当电压跌落深度较大的时候, 通过改变光伏系统的输出实现故障工况下不平衡功率的快速消除, 提高了低电压穿越期间光伏并网发电系统的稳定性。

[0109] 基于本发明提供的光伏系统低电压穿越方法, 本发明还提供一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越系统, 所述光伏系统低电压穿越系统包括:

[0110] 系统参数获取模块, 用于获取光伏并网发电系统中的逆变器输出功率和直流母线

电压;所述光伏并网发电系统包括光伏系统、Boost电路、逆变器和电网;

[0111] 变功率输出控制判断模块,用于根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压判断是否执行变功率输出控制,获得第一判断结果;

[0112] 最大功率输出保持模块,用于若所述第一判断结果为不执行变功率输出控制,则所述光伏并网发电系统中的所述光伏系统保持最大功率输出状态;

[0113] 占空比计算模块,用于若所述第一判断结果为执行变功率输出控制,则根据所述逆变器输出功率和所述直流母线电压确定Boost电路输出占空比;

[0114] 输出功率调节模块,用于根据所述Boost电路输出占空比调整所述光伏系统的输出功率;

[0115] 电网电压值获取模块,用于获取所述光伏并网发电系统电压跌落后的电网电压值;

[0116] 有功无功电流给定值计算模块,用于根据所述电压跌落后的电网电压值确定无功电流给定值和有功电流给定值;

[0117] 无功功率调节模块,用于根据所述无功电流给定值和所述有功电流给定值调整所述光伏并网发电系统中所述逆变器发出的无功功率。

[0118] 其中,所述变功率输出控制判断模块具体包括:

[0119] 输出功率判断单元,用于判断所述逆变器输出功率是否小于或等于故障期间有功功率参考值,获得第二判断结果;

[0120] 第一判断结果单元,用于若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率大于故障期间有功功率参考值,确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;

[0121] 直流母线电压判断单元,用于若所述第二判断结果为所述逆变器输出功率小于或等于故障期间有功功率参考值,则判断所述直流母线电压是否小于或等于设定电压值下限,获得第三判断结果;

[0122] 第二判断结果单元,用于若所述第三判断结果为所述直流母线电压小于或等于设定电压值下限,则确定所述第一判断结果为不执行变功率输出控制;

[0123] 第三判断结果单元,用于若所述第三判断结果为所述直流母线电压大于设定电压值下限且小于设定电压值上限,则确定所述第一判断结果为执行变功率输出控制。

[0124] 所述占空比计算模块具体包括:

[0125] 直流母线电流计算单元,用于根据所述逆变器输出功率 $P_{inj}$ 和所述直流母线电压 $U_{dc}$ ,采用公式 $I_{dc} = P_{inj} / U_{dc}$ 确定直流母线电流 $I_{dc}$ ;

[0126] 电流功率参数获取单元,用于获取所述光伏系统最大功率点处对应的电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ;

[0127] 电流参考值计算单元,用于根据所述电流值 $I_M$ 和功率值 $P_M$ ,采用公式

$I_{pv}^* = P_{PV}^* / (P_M I_M)$ 确定所述光伏系统最大功率点处的电流参考值 $I_{pv}^*$ ;其中 $P_{PV}^*$ 为所述光伏系统最大功率点处的输出功率参考值;

[0128] 占空比计算单元,用于根据所述直流母线电流 $I_{dc}$ 和所述电流参考值 $I_{pv}^*$ ,采用公式 $D = 1 - I_{dc} / I_{pv}^*$ 确定Boost电路输出占空比 $D$ 。

[0129] 所述有功无功电流给定值计算模块具体包括：

[0130] 无功电流给定值计算单元，用于根据所述电压跌落后的电网电压值 $U$ ，采用方程组

$$\begin{cases} \frac{i_q^*}{i_N} = 0, \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = -2 \frac{U}{U_N} + 2, 0.5 < \frac{U}{U_N} < 0.9 \\ \frac{i_q^*}{i_N} = 1, \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \end{cases}$$

确定无功电流给定值 $i_q^*$ ；其中 $U_N$ 表示电网电压额定

值； $i_N$ 表示逆变器输出电流额定值；

[0131] 有功电流给定值计算单元，用于根据所述无功电流给定值 $i_q^*$ ，采用公式

$$i_d^* = \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2}$$

确定有功电流给定值 $i_d^*$ 。

[0132] 下面利用仿真模型来进一步说明本发明方法及系统的技术效果。在Matlab/Simulink中建立一个容量为21kW的两级三相光伏并网发电系统的仿真模型，验证本发明提出的一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法的可行性。实验仿真模拟了在光伏测试标准环境条件（光照度 $S$ 为1000W/m<sup>2</sup>，温度 $T$ 为25℃）下电网电压降落时的仿真结果，仿真结果如图7所示，仿真结果展示了低电压穿越过程中并网系统运行状态的动态变化过程。

[0133] 图7为本发明提供的基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法的仿真结果示意图，仿真参数设置为：电网电压380V，频率150Hz，0.5s发生对称跌落故障，跌落深度70%，0.8s恢复；图6中两个PI调节器参数分别设置为 $K_{p1}=10$ ， $K_{p2}=17$ ， $K_{i1}=120$ ， $K_{i2}=1200$ ；滞环电压分别为730V和675V；直流母线的最大允许电压 $U_0$ 为740V。

[0134] 其中图7(a)为光伏系统输出功率示意图，横坐标为时间，纵坐标为光伏系统输出功率；图7(b)为直流母线电压示意图，横坐标为时间，纵坐标为直流母线电压；图7(c)为逆变器输出有功功率示意图，横坐标为时间，纵坐标为逆变器输出的有功功率；图7(d)为逆变器输出无功功率示意图，横坐标为时间，纵坐标为逆变器输出的无功功率。由图7(a)可见，当电压跌落深度较大为70%时，光伏系统最初工作在最大功率点，随着直流母线电压的上升，光伏系统开始调整自身的输出功率值完成低电压穿越过程。结合图7(a)、(b)可见，直流母线电压数值超过730V时，光伏系统会减小其输出的功率将直流母线电压稳定在阈值电压740V以下。如图7(c)、(d)所示，此时逆变器实现全无功运行，符合低电压穿越期间功率输出的要求。

[0135] 本发明公开了新能源并网发电系统保护与控制技术领域的一种基于变功率输出控制的光伏系统低电压穿越方法及系统，在电网电压跌落深度较大时，立足于逆变器两侧的功率平衡问题，主动调整光伏系统的输出，快速消除因电网故障产生的不平衡功率；故障期间根据电压跌落深度的不同，重新进行有功无功电流值的分配，保证逆变器输出不过流，完成低电压穿越过程。采用本发明方案可以兼顾光伏并网发电系统在电网故障期间的安全

稳定运行以及太阳能资源的充分利用,同现有技术方案相比,更具有优越性。

[0136] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的系统而言,由于其与实施例公开的方法相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。

[0137] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。



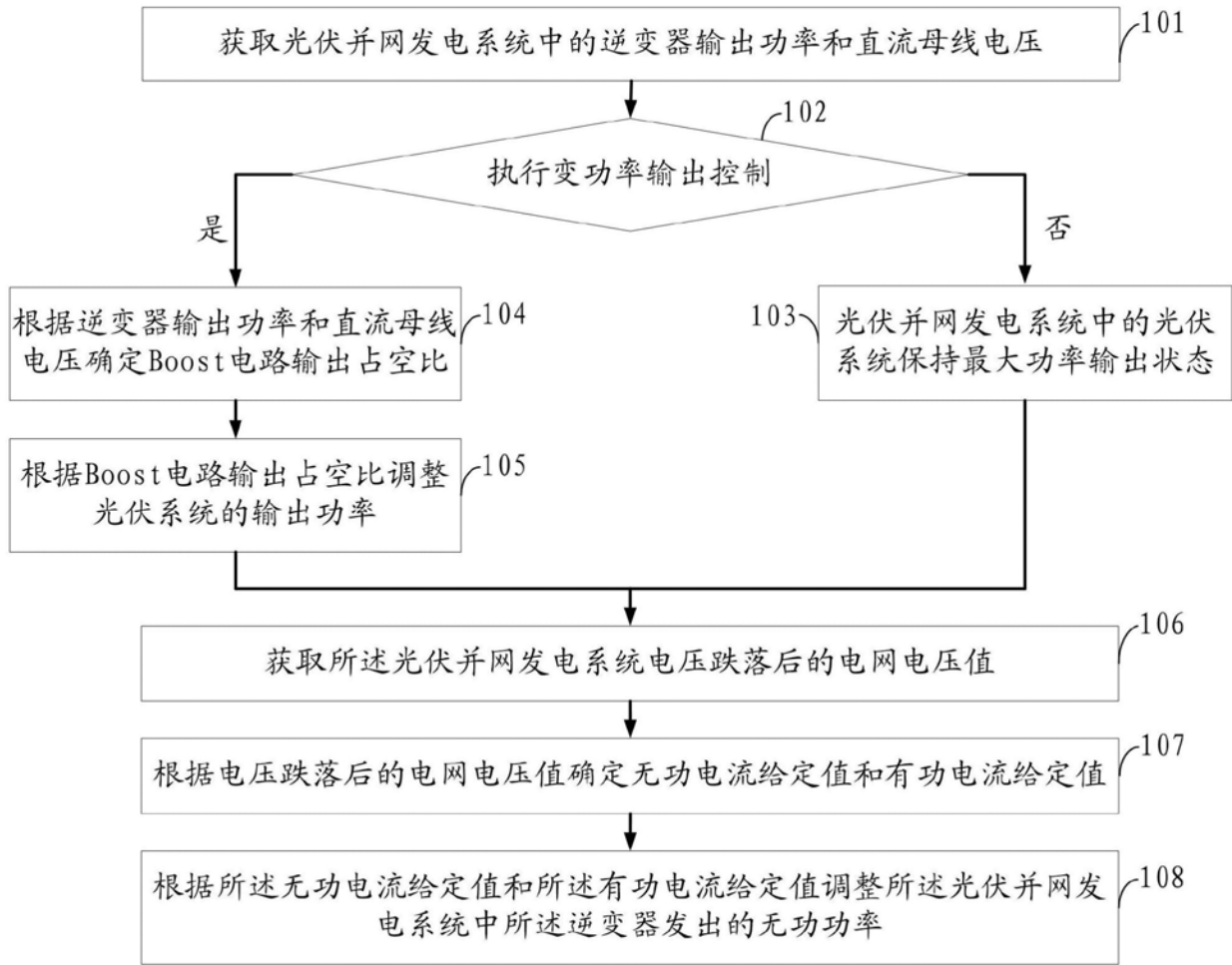


图1

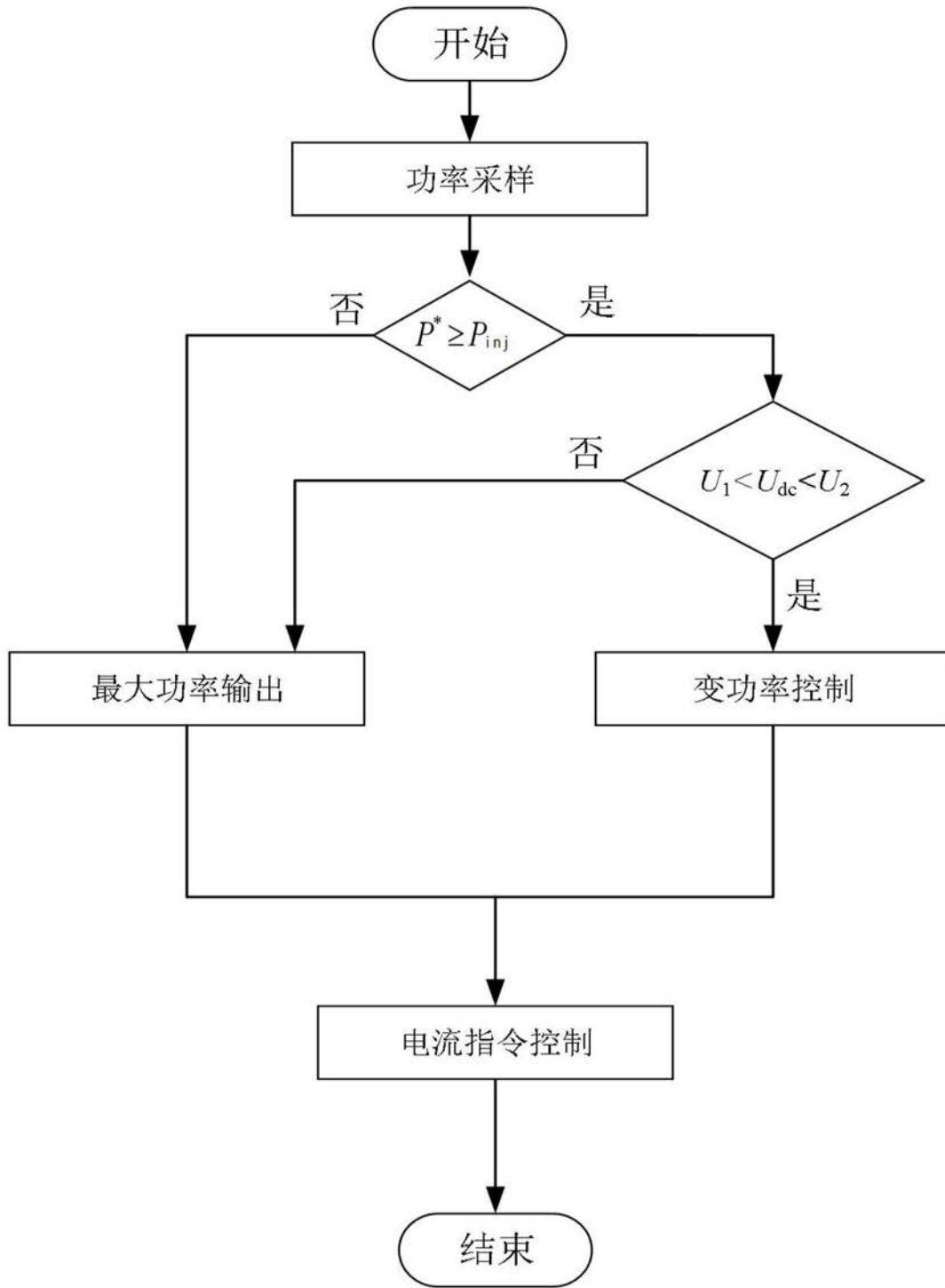


图2

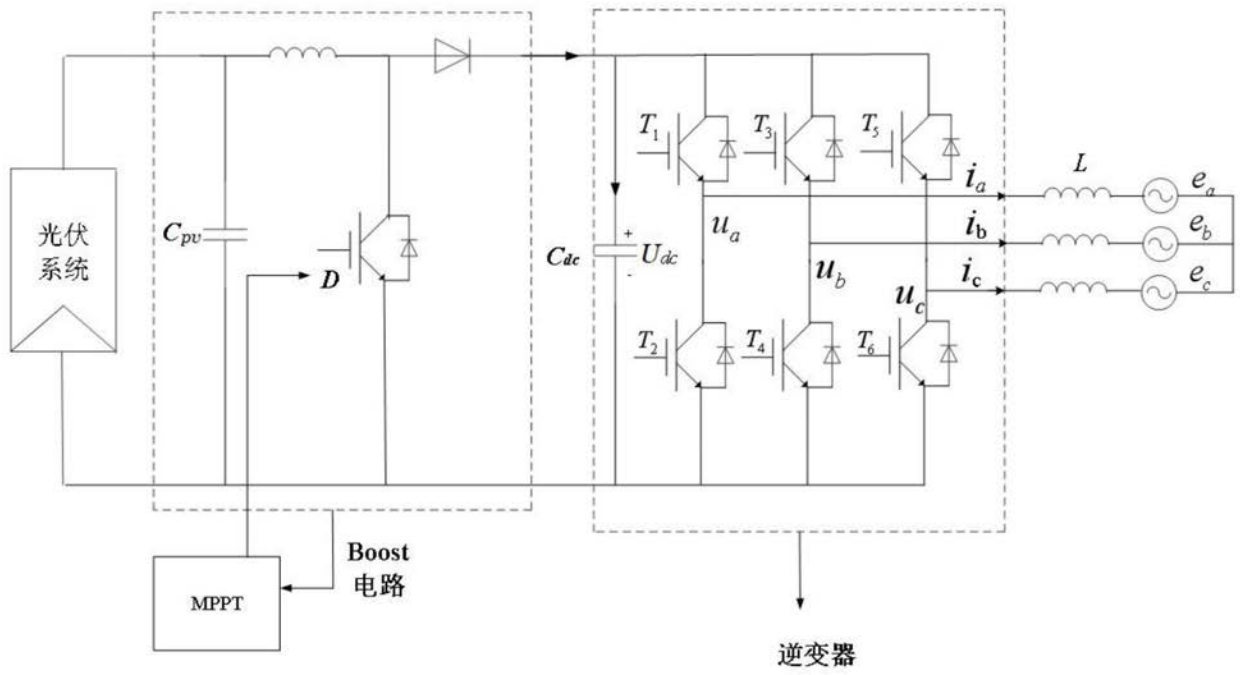


图3

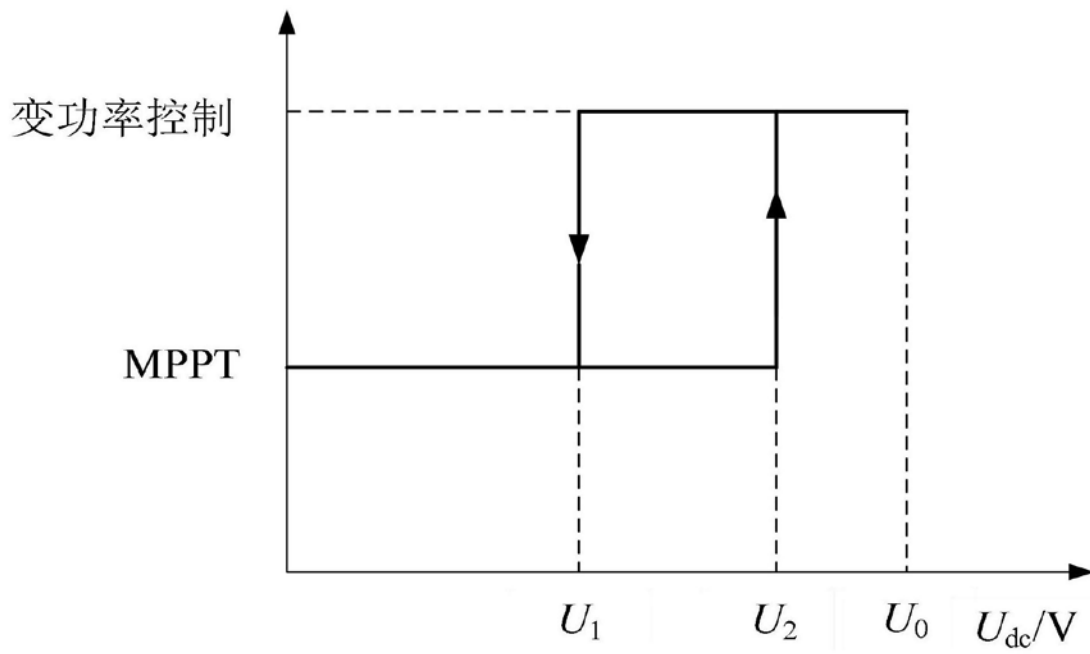


图4

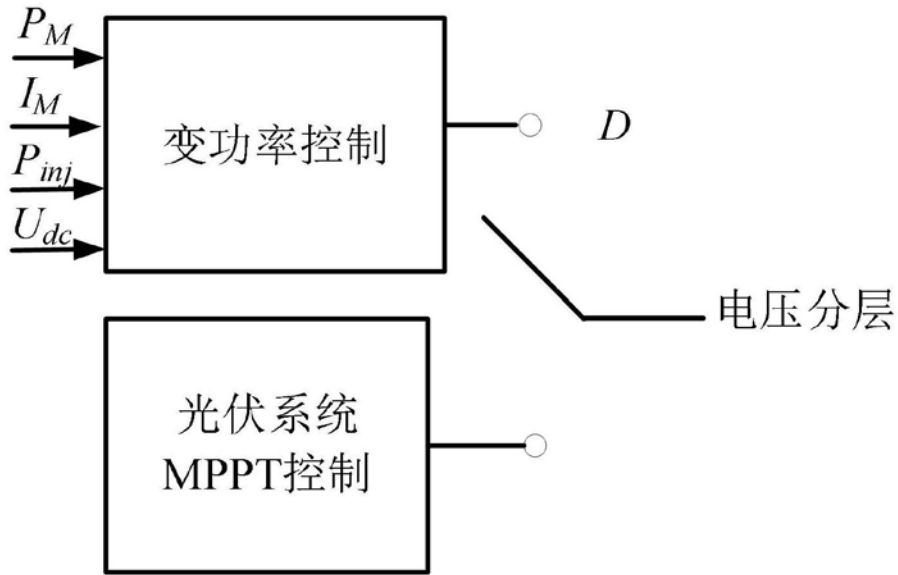


图5

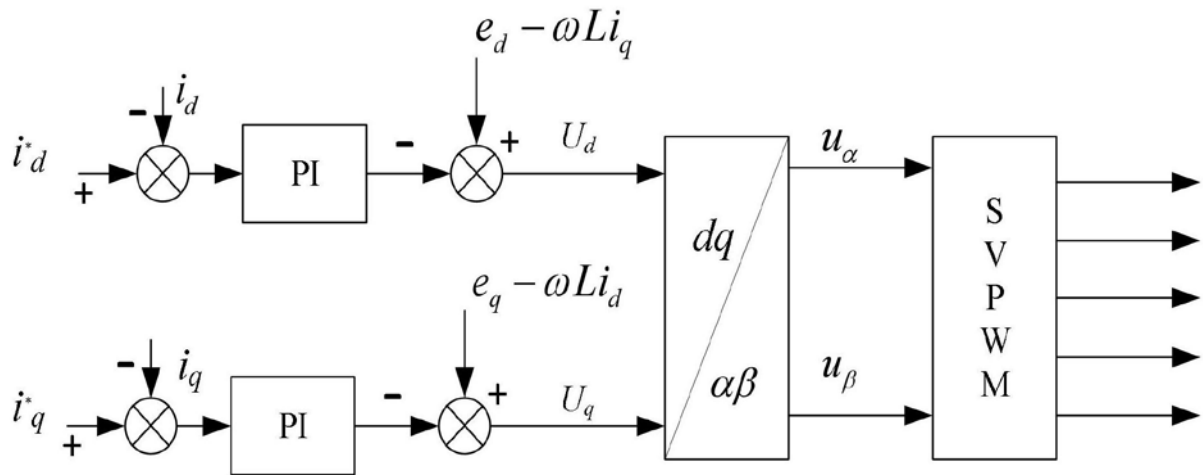
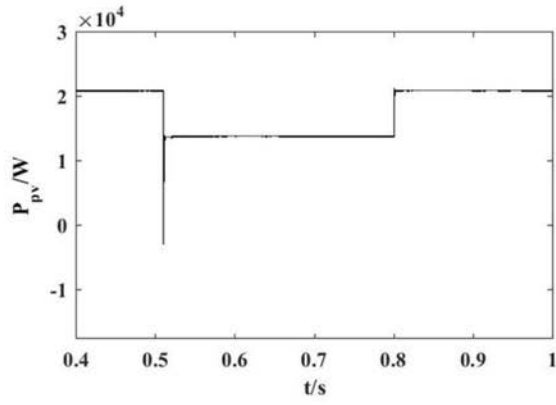
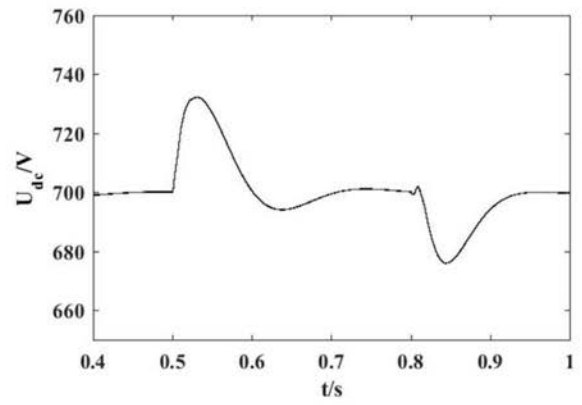


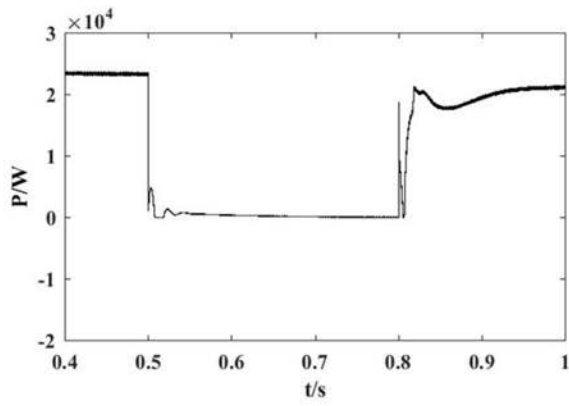
图6



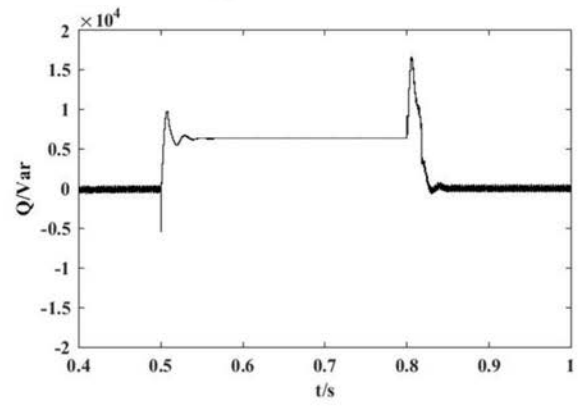
(a)光伏系统输出功率



(b)直流母线电压



(c)逆变器输出有功功率



(d)逆变器输出无功功率

图7