



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107453389 A

(43)申请公布日 2017. 12. 08

(21)申请号 201610378735.7

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2016.05.31

H02J 3/38(2006.01)

(71)申请人 中国电力科学研究院

地址 210003 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  
国网新疆电力公司电力科学研究院

(72)发明人 葛路明 曲立楠 朱凌志 陈宁

丁杰 张磊 韩华玲 赵大伟

施涛 钱敏慧 刘艳章 赵亮

姜达军 王湘艳 于若英 罗芳

(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

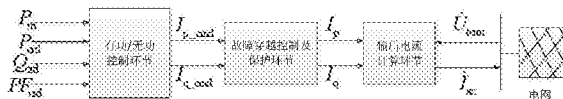
权利要求书4页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

一种组串式光伏逆变器机电暂态模型建模方法

(57)摘要

本发明涉及一种组串式光伏逆变器机电暂态模型建模方法,所述方法包括:建立控制模型和输出电流模型;本发明所述的建模方法在对组串式逆变器的工作原理和控制策略深入分析后,提取出逆变器的关键外特性,结合电力系统机电暂态仿真的特点,建立仿真速度快、收敛性好的机电暂态模型,依据本发明所述的方法建立的模型具有结构清晰、物理意义明确、易于实现的优点,能够准确模拟组串式逆变器在受到扰动和遭遇故障时的动态响应外特性,可以满足基于组串式逆变器的光伏电站并网分析的需求。



1. 一种组串式光伏逆变器机电暂态模型建模方法,其特征在于,所述方法包括:建立控制模型和输出电流模型。

2. 如权利要求1所述的建模方法,其特征在于,所述控制模型包括:有功类控制模型、无功类控制模型、故障穿越控制模型和保护控制模型。

3. 如权利要求2所述的建模方法,其特征在于,所述有功类控制模型如下式所示:

$$P\_flag = \begin{cases} 0 & \text{最大功率跟踪模式} \\ 1 & \text{恒定有功功率控制模式} \end{cases} \quad (1)$$

在最大功率跟踪模式下,有功功率参考值 $P_{ref}$ 如下式所示:

$$\begin{cases} P_{ref} = P_m \cdot \frac{1}{1 + sT_{mpp}} \\ dP_{m\_min} \leq \frac{P_{ref}(i) - P_{ref}(i-1)}{dt} \leq dP_{m\_max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_m$ 表示光伏方阵的最大输出功率, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_{mpp}$ 表示最大功率跟踪时间常数, $P_{ref}(i-1)$ 、 $P_{ref}(i)$ 分别表示第*i*-1和*i*个时刻的有功功率参考值, $dt$ 表示第*i*-1和*i*时刻之间的时间间隔, $dP_{m\_max}$ 和 $dP_{m\_min}$ 分别表示最大功率跟踪斜率上限和最大功率跟踪斜率下限;

在恒定有功功率控制模式下,有功功率参考值 $P_{ref}$ 如下式所示:

$$\begin{cases} P_{ref} = P_{ord} \cdot \frac{1}{1 + sT_{p\_ord}} \\ 0 \leq P_{ref} \leq P_m \\ dP_{ord\_min} \leq \frac{P_{ref}(i) - P_{ref}(i-1)}{dt} \leq dP_{ord\_max} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $P_{ord}$ 表示上级控制器下发的有功控制指令, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_{p\_ord}$ 表示通讯延时时间常数, $P_m$ 表示光伏方阵的最大输出功率, $P_{ref}(i-1)$ 、 $P_{ref}(i)$ 分别表示第*i*-1和*i*个时刻的有功功率参考值, $dt$ 表示第*i*-1和*i*时刻之间的时间间隔, $dP_{ord\_max}$ 和 $dP_{ord\_min}$ 分别表示有功控制斜率上限和有功控制斜率下限。

4. 如权利要求3所述的建模方法,其特征在于,有功功率测量值 $P_{mea}$ 如下式所示:

$$P_{mea} = \frac{1}{1 + sT_m} \cdot P \quad (4)$$

式中, $P$ 表示逆变器的有功功率, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_m$ 表示测量时间常数;有功电流指令 $I_{p\_cmd}$ 如下式所示:

$$I_{p\_cmd} = (P_{ref} - P_{mea}) \cdot K_p \left(1 + \frac{1}{sT_p}\right) \quad (5)$$

式中, $K_p$ 表示比例积分PI调节器的比例常数, $T_p$ 表示比例积分PI调节器的积分常数, $P_{ref}$ 表示有功功率参考值, $s$ 表示传递函数中复变量, $P_{mea}$ 表示有功功率测量值;

所述有功电流指令 $I_{p\_cmd}$ 的约束条件如下式所示:

$$I_{pmin} \leq I_{p\_cmd} \leq I_{pmax} \quad (6)$$

式中,  $I_{pmax}$ 表示逆变器的最大有功电流值,  $I_{pmin}$ 表示逆变器的最小有功电流值。

5. 如权利要求2所述的建模方法, 其特征在于, 所述无功类控制模型如下式所示:

$$Q\_flag = \begin{cases} 0 & \text{恒定功率因数控制模式} \\ 1 & \text{恒定无功功率控制模式} \end{cases} \quad (7)$$

在所述恒定功率因数模式下, 无功功率参考值 $Q_{ref}$ 如下式所示:

$$\begin{cases} Q_{ref} = \frac{\sqrt{1-PF_{ord}^2}}{PF_{ord}} \cdot \frac{1}{1+sT_{q\_ord}} \\ dQ_{ord\_min} \leq \frac{Q_{ref}(i)-Q_{ref}(i-1)}{dt} \leq dQ_{ord\_max} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $PF_{ord}$ 表示上级控制器下发的功率因数控制指令,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_{q\_ord}$ 表示通讯延时时间常数,  $Q_{ref}(i-1)$ 、 $Q_{ref}(i)$ 分别表示第 $i-1$ 和 $i$ 个时刻的无功功率参考值,  $dt$ 表示第 $i-1$ 和 $i$ 时刻之间的时间间隔,  $dQ_{ord\_max}$ 和 $dQ_{ord\_min}$ 分别表示无功控制斜率上限和无功控制斜率下限;

在所述恒定无功功率模式下, 无功功率参考值 $Q_{ref}$ 如下式所示:

$$\begin{cases} Q_{ref} = Q_{ord} \cdot \frac{1}{1+sT_{q\_ord}} \\ dQ_{ord\_min} \leq \frac{Q_{ref}(i)-Q_{ref}(i-1)}{dt} \leq dQ_{ord\_max} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $Q_{ord}$ 表示上级控制器下发的无功功率控制指令,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_{q\_ord}$ 表示通讯延时时间常数,  $Q_{ref}(i-1)$ 、 $Q_{ref}(i)$ 分别表示第 $i-1$ 和 $i$ 个时刻的无功功率参考值,  $dt$ 表示第 $i-1$ 和 $i$ 时刻之间的时间间隔,  $dQ_{ord\_max}$ 和 $dQ_{ord\_min}$ 分别表示无功控制斜率上限和无功控制斜率下限。

6. 如权利要求5所述的建模方法, 其特征在于, 无功功率测量值 $Q_{mea}$ 如下式所示:

$$Q_{mea} = \frac{1}{1+sT_m} \cdot Q \quad (10)$$

式中,  $Q$ 表示逆变器的有功功率,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_m$ 表示测量时间常数; 无功电流指令 $I_{q\_cmd}$ 如下式所示:

$$I_{q\_cmd} = (Q_{ref} - Q_{mea}) \cdot K_q \left(1 + \frac{1}{sT_q}\right) \quad (11)$$

式中,  $K_q$ 表示比例积分PI调节器的比例常数,  $T_q$ 表示比例积分PI调节器的积分常数,  $Q_{ref}$ 表示无功功率参考值,  $Q_{mea}$ 表示无功功率测量值;  $s$ 表示传递函数中复变量。

所述无功电流指令 $I_{q\_cmd}$ 的约束条件如下式所示:

$$I_{qmin} \leq I_{q\_cmd} \leq I_{qmax} \quad (12)$$

式中,  $I_{qmax}$ 表示逆变器的最大无功电流值,  $I_{qmin}$ 表示逆变器的最小无功电流值。

7. 如权利要求2所述的建模方法, 其特征在于, 所述有功类控制模型和无功类控制模型的电流限幅模式如下式所示:

$$\text{PQ\_flag} = \begin{cases} 0 & \text{无功优先模式} \\ 1 & \text{有功优先模式} \end{cases} \quad (13)$$

所述无功优先模式的电流按下式计算：

$$\begin{cases} I_{q\max} = I_{\max} \\ I_{q\min} = -I_{\max} \\ I_{p\max} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{q\text{cmd}}^2} \\ I_{p\min} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

所述有功优先模式的电流按下式计算：

$$\begin{cases} I_{p\max} = I_{\max} \\ I_{p\min} = 0 \\ I_{q\max} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{p\text{cmd}}^2} \\ I_{q\min} = -\sqrt{I_{\max}^2 - I_{p\text{cmd}}^2} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $I_{\max}$ : 逆变器的最大电流值,  $I_{q\max}$ : 逆变器的最大无功电流值,  $I_{q\min}$ : 逆变器的最小无功电流值,  $I_{p\max}$ : 逆变器的最大有功电流值,  $I_{p\min}$ : 逆变器的最小有功电流值,  $I_{q\text{cmd}}$ : 无功电流指令,  $I_{p\text{cmd}}$ : 有功电流指令。

8. 如权利要求2所述的建模方法, 其特征在于, 所述故障穿越控制模型的有功电流  $I_p$  和无功电流  $I_q$  分别如下式所示:

$$I_p = \begin{cases} I_{p\text{cmd}} & (U_{LV1} < U_{\text{term}} < U_{HV1}) \\ I_{p\_FRT} & (U_{\text{term}} \leq U_{LV1}) \end{cases} \quad (16)$$

$$I_q = \begin{cases} I_{q\text{cmd}} & (U_{LV1} < U_{\text{term}} < U_{HV1}) \\ \min(K_{q\_LV}(U_{LV1} - U_{\text{term}}) + I_{q0\_LV}, I_{q\max\_LV}) & (U_{\text{term}} \leq U_{LV1}) \end{cases}$$

$I_{p\_FRT}$ : 低电压穿越和零电压穿越控制的有功电流值,  $U_{\text{term}}$ : 交流侧端电压,  $K_{q\_LV}$ : 低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流支撑系数,  $I_{q0\_LV}$ : 低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流初始值,  $I_{q\max\_LV}$ : 低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流最大值,  $U_{LV1}$ : 低电压穿越控制的电压阈值,  $U_{HV1}$ : 高电压穿越控制的电压阈值,  $I_{p\text{cmd}}$  和  $I_{q\text{cmd}}$  分别表示有功电流指令和无功电流指令。

9. 如权利要求2所述的建模方法, 其特征在于, 所述保护控制模型如下式所示:

$$\text{trip\_flag} = \begin{cases} 0 & \text{逆变器正常运行} \\ 1 & \text{触发保护动作, 逆变器退出运行} \end{cases} \quad (17)$$

所述  $\text{trip\_flag}=1$  包括:

- 1) 若  $U_{LVP2} \leq U_{\text{term}} \leq U_{LVP1}$  且持续时间超过  $t_{LVP1}$ , 一级欠压保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;
- 2) 若  $U_{\text{term}} \leq U_{LVP2}$  且持续时间超过  $t_{LVP2}$ , 二级欠压保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;
- 3) 若  $U_{HVP1} \leq U_{\text{term}} \leq U_{HVP2}$  且持续时间超过  $t_{HVP1}$ , 一级过压保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;
- 4) 若  $U_{HVP2} < U_{\text{term}}$  且持续时间超过  $t_{HVP2}$ , 二级过压保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

- 5)若 $f_{LFP2} \leq f \leq f_{LFP1}$ 且持续时间超过 $t_{LFP1}$ ,一级欠频保护动作, $trip\_flag=1$ ;  
 6)若 $f < f_{LFP2}$ 且持续时间超过 $t_{LFP2}$ ,二级欠频保护动作, $trip\_flag=1$ ;  
 7)若 $f_{HFP1} \leq f \leq f_{HFP2}$ 且持续时间超过 $t_{HFP1}$ ,一级过频保护动作, $trip\_flag=1$ ;  
 8)若 $f_{HFP2} < f$ 且持续时间超过 $t_{HFP2}$ ,二级过频保护动作, $trip\_flag=1$ ;

$U_{LVP1}$ :一级欠压保护整定电压, $t_{LVP1}$ :一级欠压保护动作时间, $U_{term}$ :交流侧端电压, $U_{LVP2}$ :二级欠压保护整定电压, $t_{LVP2}$ :二级欠压保护动作时间, $U_{HVP1}$ :一级过压保护整定电压, $t_{HVP1}$ :一级过压保护动作时间, $U_{HVP2}$ :二级过压保护整定电压, $t_{HVP2}$ :二级过压保护动作时间, $f$ :电网频率, $f_{LFP1}$ :一级欠频保护整定频率, $t_{LFP1}$ :一级欠频保护动作时间, $f_{LFP2}$ :二级欠频保护整定频率, $t_{LFP2}$ :二级欠频保护动作时间, $f_{HFP1}$ :一级过频保护整定频率, $t_{HFP1}$ :一级过频保护动作时间, $f_{HFP2}$ :二级过频保护整定频率, $t_{HFP2}$ :二级过频保护动作时间。

10.如权利要求1所述的建模方法,其特征在于,所述输出电流模型的输出电流相量 $\dot{I}_{ac}$ 如下式所示:

$$\dot{I}_{ac} = \left( \frac{|\dot{U}_{term}| \cdot I_p - j |\dot{U}_{term}| \cdot I_q}{\dot{U}_{term}} \right)^* \quad (18)$$

式中, $\dot{U}_{term}$ :交流侧端电压相量, $I_p$ :有功电流, $I_q$ :无功电流, $j$ :虚数单位。

## 一种组串式光伏逆变器机电暂态模型建模方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种建模方法,具体讲涉及一种组串式光伏逆变器机电暂态模型建模方法。

### 背景技术

[0002] 近年来,我国光伏发电大规模发展。目前,大型地面光伏电站通常采用集中式逆变器的并网方案,将光伏阵列串并联后连接集中式逆变器,逆变器功率等级可以到达1兆瓦以上。然而,随着组串式逆变器成本的下降,各大主流逆变器厂商都推出了自己的组串式逆变器方案,愈来愈多的光伏电站开始采用基于组串式逆变器的并网方案。典型的组串式并网方案是将若干路光伏组串连接组串式逆变器,逆变器功率一般仅为数十千瓦,数十台逆变器直接并联后连接升压变,组成一个1兆瓦左右光伏发电单元,随后汇入电站集电系统。组串式逆变器的功率匹配性好,同时具备多路最大功率跟踪(MPPT)功能,具有安装灵活、易于施工的优点,而且省去了直流汇流箱和逆变器室等投资。

[0003] 随着组串式逆变器的迅猛发展,组串式逆变器并网方案正在成为新的技术趋势,越来越迫切地需要建立组串式逆变器的机电暂态模型,分析基于组串式逆变器的光伏电站对电网的影响。因为基于组串式逆变器的光伏电站目前尚处于起步发展阶段,现有文献主要研究组串式逆变器的拓扑结构、效率、可靠性、电气安全、价格趋势和市场前景等方面,而对组串式逆变器的机电暂态建模研究关注不够。

[0004] 因此,为了满足基于组串式逆变器的光伏电站并网分析的需求,迫切需要结合组串式逆变器的工作原理和并网外特性,建立组串式逆变器的机电暂态模型。

### 发明内容

[0005] 为了解决现有技术中所存在的上述不足,本发明提供一种组串式光伏逆变器机电暂态模型建模方法。

[0006] 本发明提供的技术方案是:一种组串式光伏逆变器机电暂态模型建模方法,所述方法包括:建立控制模型和输出电流模型。

[0007] 优选的,所述控制模型包括:有功类控制模型、无功类控制模型、故障穿越控制模型和保护控制模型。

[0008] 优选的,所述有功类控制模型如下式所示:

[0009]

$$P\_flag = \begin{cases} 0 & \text{最大功率跟踪模式} \\ 1 & \text{恒定有功功率控制模式} \end{cases} \quad (1)$$

[0010] 在最大功率跟踪模式下,有功功率参考值 $P_{ref}$ 如下式所示:

$$[0011] \quad \begin{cases} P_{\text{ref}} = P_m \cdot \frac{1}{1 + sT_{\text{mpp}}} \\ dP_{\text{m\_min}} \leq \frac{P_{\text{ref}}(i) - P_{\text{ref}}(i-1)}{dt} \leq dP_{\text{m\_max}} \end{cases} \quad (2)$$

[0012] 式中,  $P_m$ 表示光伏方阵的最大输出功率,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_{\text{mpp}}$ 表示最大功率跟踪时间常数,  $P_{\text{ref}}(i-1)$ 、 $P_{\text{ref}}(i)$ 分别表示第*i*-1和*i*个时刻的有功功率参考值,  $dt$ 表示第*i*-1和*i*时刻之间的时间间隔,  $dP_{\text{m\_max}}$ 和 $dP_{\text{m\_min}}$ 分别表示最大功率跟踪斜率上限和最大功率跟踪斜率下限;

[0013] 在恒定有功功率控制模式下, 有功功率参考值 $P_{\text{ref}}$ 如下式所示:

$$[0014] \quad \begin{cases} P_{\text{ref}} = P_{\text{ord}} \cdot \frac{1}{1 + sT_{\text{p\_ord}}} \\ 0 \leq P_{\text{ref}} \leq P_m \\ dP_{\text{ord\_min}} \leq \frac{P_{\text{ref}}(i) - P_{\text{ref}}(i-1)}{dt} \leq dP_{\text{ord\_max}} \end{cases} \quad (3)$$

[0015] 式中,  $P_{\text{ord}}$ 表示上级控制器下发的有功控制指令,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_{\text{p\_ord}}$ 表示通讯延时时间常数,  $P_m$ 表示光伏方阵的最大输出功率,  $P_{\text{ref}}(i-1)$ 、 $P_{\text{ref}}(i)$ 分别表示第*i*-1和*i*个时刻的有功功率参考值,  $dt$ 表示第*i*-1和*i*时刻之间的时间间隔,  $dP_{\text{ord\_max}}$ 和 $dP_{\text{ord\_min}}$ 分别表示有功控制斜率上限和有功控制斜率下限。

[0016] 优选的, 有功功率测量值 $P_{\text{mea}}$ 如下式所示:

$$[0017] \quad P_{\text{mea}} = \frac{1}{1 + sT_m} \cdot P \quad (4)$$

[0018] 式中,  $P$ 表示逆变器的有功功率,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_m$ 表示测量时间常数;

[0019] 有功电流指令 $I_{\text{p\_cmd}}$ 如下式所示:

$$[0020] \quad I_{\text{p\_cmd}} = (P_{\text{ref}} - P_{\text{mea}}) \cdot K_p \left(1 + \frac{1}{sT_p}\right) \quad (5)$$

[0021] 式中,  $K_p$ 表示比例积分PI调节器的比例常数,  $T_p$ 表示比例积分PI调节器的积分常数,  $P_{\text{ref}}$ 表示有功功率参考值,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $P_{\text{mea}}$ 表示有功功率测量值;

[0022] 所述有功电流指令 $I_{\text{p\_cmd}}$ 的约束条件如下式所示:

$$[0023] \quad I_{\text{pmin}} \leq I_{\text{p\_cmd}} \leq I_{\text{pmax}} \quad (6)$$

[0024] 式中,  $I_{\text{pmax}}$ 表示逆变器的最大有功电流值,  $I_{\text{pmin}}$ 表示逆变器的最小有功电流值。

[0025] 优选的, 所述无功类控制模型如下式所示:

[0026]

$$Q_{\text{-flag}} = \begin{cases} 0 & \text{恒定功率因数控制模式} \\ 1 & \text{恒定无功功率控制模式} \end{cases} \quad (7)$$

[0027] 在所述恒定功率因数模式下, 无功功率参考值 $Q_{\text{ref}}$ 如下式所示:

$$[0028] \quad \begin{cases} Q_{\text{ref}} = \frac{\sqrt{1-PF_{\text{ord}}^2}}{PF_{\text{ord}}} \cdot \frac{1}{1+sT_{q_{\text{ord}}}} \\ dQ_{\text{ord\_min}} \leq \frac{Q_{\text{ref}}(i)-Q_{\text{ref}}(i-1)}{dt} \leq dQ_{\text{ord\_max}} \end{cases} \quad (8)$$

[0029] 式中,  $PF_{\text{ord}}$ 表示上级控制器下发的功率因数控制指令,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_{q_{\text{ord}}}$ 表示通讯延时时间常数,  $Q_{\text{ref}}(i-1)$ 、 $Q_{\text{ref}}(i)$ 分别表示第*i-1*和*i*个时刻的无功功率参考值,  $dt$ 表示第*i-1*和*i*时刻之间的时间间隔,  $dQ_{\text{ord\_max}}$ 和 $dQ_{\text{ord\_min}}$ 分别表示无功控制斜率上限和无功控制斜率下限;

[0030] 在所述恒定无功功率模式下, 无功功率参考值 $Q_{\text{ref}}$ 如下式所示:

$$[0031] \quad \begin{cases} Q_{\text{ref}} = Q_{\text{ord}} \cdot \frac{1}{1+sT_{q_{\text{ord}}}} \\ dQ_{\text{ord\_min}} \leq \frac{Q_{\text{ref}}(i)-Q_{\text{ref}}(i-1)}{dt} \leq dQ_{\text{ord\_max}} \end{cases} \quad (9)$$

[0032] 式中,  $Q_{\text{ord}}$ 表示上级控制器下发的无功功率控制指令,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_{q_{\text{ord}}}$ 表示通讯延时时间常数,  $Q_{\text{ref}}(i-1)$ 、 $Q_{\text{ref}}(i)$ 分别表示第*i-1*和*i*个时刻的无功功率参考值,  $dt$ 表示第*i-1*和*i*时刻之间的时间间隔,  $dQ_{\text{ord\_max}}$ 和 $dQ_{\text{ord\_min}}$ 分别表示无功控制斜率上限和无功控制斜率下限。

[0033] 优选的, 无功功率测量值 $Q_{\text{mea}}$ 如下式所示:

$$[0034] \quad Q_{\text{mea}} = \frac{1}{1+sT_m} \cdot Q \quad (10)$$

[0035] 式中,  $Q$ 表示逆变器的有功功率,  $s$ 表示传递函数中复变量,  $T_m$ 表示测量时间常数;

[0036] 无功电流指令 $I_{q\_cmd}$ 如下式所示:

$$[0037] \quad I_{q\_cmd} = (Q_{\text{ref}} - Q_{\text{mea}}) \cdot K_q \left(1 + \frac{1}{sT_q}\right) \quad (11)$$

[0038] 式中,  $K_q$ 表示比例积分PI调节器的比例常数,  $T_q$ 表示比例积分PI调节器的积分常数,  $Q_{\text{ref}}$ 表示无功功率参考值,  $Q_{\text{mea}}$ 表示无功功率测量值;  $s$ 表示传递函数中复变量。

[0039] 所述无功电流指令 $I_{q\_cmd}$ 的约束条件如下式所示:

$$[0040] \quad I_{q_{\text{min}}} \leq I_{q\_cmd} \leq I_{q_{\text{max}}} \quad (12)$$

[0041] 式中,  $I_{q_{\text{max}}}$ 表示逆变器的最大无功电流值,  $I_{q_{\text{min}}}$ 表示逆变器的最小无功电流值。

[0042] 优选的, 所述有功类控制模型和无功类控制模型的电流限幅模式如下式所示:

$$[0043] \quad PQ\_flag = \begin{cases} 0 & \text{无功优先模式} \\ 1 & \text{有功优先模式} \end{cases} \quad (13)$$

[0044] 所述无功优先模式的电流按下式计算:

$$[0045] \quad \begin{cases} I_{q_{\text{max}}} = I_{\text{max}} \\ I_{q_{\text{min}}} = -I_{\text{max}} \\ I_{p_{\text{max}}} = \sqrt{I_{\text{max}}^2 - I_{q\_cmd}^2} \\ I_{p_{\text{min}}} = 0 \end{cases} \quad (14)$$



[0046] 所述有功优先模式的电流按下式计算：

$$[0047] \begin{cases} I_{p\max} = I_{\max} \\ I_{p\min} = 0 \\ I_{q\max} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{p\_cmd}^2} \\ I_{q\min} = -\sqrt{I_{\max}^2 - I_{p\_cmd}^2} \end{cases} \quad (15)$$

[0048] 式中,  $I_{\max}$ : 逆变器的最大电流值,  $I_{q\max}$ : 逆变器的最大无功电流值,  $I_{q\min}$ : 逆变器的最小无功电流值,  $I_{p\max}$ : 逆变器的最大有功电流值,  $I_{p\min}$ : 逆变器的最小有功电流值,  $I_{q\_cmd}$ : 无功电流指令,  $I_{p\_cmd}$ : 有功电流指令。

[0049] 优先的, 所述故障穿越控制模型的有功电流  $I_p$  和无功电流  $I_q$  分别如下式所示：

$$[0050] I_p = \begin{cases} I_{p\_cmd} & (U_{LVI} < U_{term} < U_{HVI}) \\ I_{p\_FRT} & (U_{term} \leq U_{LVI}) \end{cases} \quad (16)$$

$$I_q = \begin{cases} I_{q\_cmd} & (U_{LVI} < U_{term} < U_{HVI}) \\ \min(K_{q\_LV}(U_{LVI} - U_{term}) + I_{q0\_LV}, I_{q\max\_LV}) & (U_{term} \leq U_{LVI}) \end{cases}$$

[0051]  $I_{p\_FRT}$ : 低电压穿越和零电压穿越控制的有功电流值,  $K_{q\_LV}$ : 低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流支撑系数,  $I_{q0\_LV}$ : 低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流初始值,  $I_{q\max\_LV}$ : 低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流最大值,  $U_{LVI}$ : 低电压穿越控制的电压阈值,  $U_{HVI}$ : 高电压穿越控制的电压阈值,  $I_{p\_cmd}$  和  $I_{q\_cmd}$  分别表示有功电流指令和无功电流指令。

[0052] 优选的, 所述保护控制模型如下式所示：

$$[0053] \text{trip\_flag} = \begin{cases} 0 & \text{逆变器正常运行} \\ 1 & \text{触发保护动作, 逆变器退出运行} \end{cases} \quad (17)$$

[0054] 所述  $\text{trip\_flag}=1$  包括：

[0055] 1) 若  $U_{LVP2} \leq U_{term} \leq U_{LVP1}$  且持续时间超过  $t_{LVP1}$ , 一级欠压保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

[0056] 2) 若  $U_{term} \leq U_{LVP2}$  且持续时间超过  $t_{LVP2}$ , 二级欠压保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

[0057] 3) 若  $U_{HVP1} \leq U_{term} \leq U_{HVP2}$  且持续时间超过  $t_{HVP1}$ , 一级过压保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

[0058] 4) 若  $U_{HVP2} < U_{term}$  且持续时间超过  $t_{HVP2}$ , 二级过压保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

[0059] 5) 若  $f_{LFP2} \leq f \leq f_{LFP1}$  且持续时间超过  $t_{LFP1}$ , 一级欠频保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

[0060] 6) 若  $f < f_{LFP2}$  且持续时间超过  $t_{LFP2}$ , 二级欠频保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

[0061] 7) 若  $f_{HFP1} \leq f \leq f_{HFP2}$  且持续时间超过  $t_{HFP1}$ , 一级过频保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

[0062] 8) 若  $f_{HFP2} < f$  且持续时间超过  $t_{HFP2}$ , 二级过频保护动作,  $\text{trip\_flag}=1$ ;

[0063]  $U_{LVP1}$ : 一级欠压保护整定电压,  $t_{LVP1}$ : 一级欠压保护动作时间,  $U_{LVP2}$ : 二级欠压保护整定电压,  $t_{LVP2}$ : 二级欠压保护动作时间,  $U_{HVP1}$ : 一级过压保护整定电压,  $t_{HVP1}$ : 一级过压保护动作时间,  $U_{HVP2}$ : 二级过压保护整定电压,  $t_{HVP2}$ : 二级过压保护动作时间,  $f$ : 电网频率,  $f_{LFP1}$ : 一级欠频保护整定频率,  $t_{LFP1}$ : 一级欠频保护动作时间,  $f_{LFP2}$ : 二级欠频保护整定频率,  $t_{LFP2}$ : 二级欠频保护动作时间,  $f_{HFP1}$ : 一级过频保护整定频率,  $t_{HFP1}$ : 一级过频保护动作时间,  $f_{HFP2}$ : 二级过频保护整定频率,  $t_{HFP2}$ : 二级过频保护动作时间。

[0064] 优选的,所述输出电流模型的输出电流相量 $\dot{I}_{ac}$ 如下式所示:

$$[0065] \quad \dot{I}_{ac} = \left( \frac{|\dot{U}_{term}| \cdot I_p - j |\dot{U}_{term}| \cdot I_q}{\dot{U}_{term}} \right)^* \quad (18)$$

[0066] 式中, $\dot{U}_{term}$ :交流侧端电压相量, $I_p$ :有功电流, $I_q$ :无功电流, $j$ :虚数单位。

[0067] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0068] 本发明为组串式光伏逆变器提供了一种机电暂态建模方法,该方法是在组串式逆变器的工作原理和控制策略深入分析后,提取出逆变器的关键外特性,结合电力系统机电暂态仿真的特点,建立仿真速度快、收敛性好的机电暂态模型。

[0069] 依据本发明所述的方法建立的模型具有结构清晰、物理意义明确、易于实现的优点,能够准确模拟组串式逆变器在受到扰动和遭遇故障时的动态响应外特性,适用于电力系统机电暂态仿真。

## 附图说明

[0070] 图1为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型结构示意图;

[0071] 图2为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型的有功类/无功类控制模型;

[0072] 图3为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型的故障穿越控制和保护控制模型;

[0073] 图4为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型的输出电流向量计算示意图;

[0074] 图5为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型的仿真环境;

[0075] 图6为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型的大功率工况下仿真值与实际测量值的对比示意图;

[0076] 图7为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型的小功率工况下仿真值与实际测量值的对比示意图。

## 具体实施方式

[0077] 为了更好地理解本发明,下面结合说明书附图和实例对本发明的内容做进一步的说明。

[0078] 本发明提供一种组串式光伏逆变器机电暂态模型建模方法,所述方法包括:建立控制模型和输出电流模型;控制模型又包括有功/无功控制模型和故障穿越控制及保护模型。

[0079] 结合图2所示,有功类控制模型通过标志位P\_flag设定逆变器的有功类控制模式,分别为最大功率跟踪模式和恒定有功功率控制模式。

[0080] 当P\_flag为0时,逆变器工作在最大功率跟踪MPPT模式下,最大功率跟踪的寻优过程用一个时间常数为 $T_{mppt}$ 的一阶惯性环节来模拟,并对最大功率的变化率进行限制,上升变化率的上限为 $dP_{m\_max}$ ,下限为 $dP_{m\_min}$ 。

[0081] 当P\_flag为1时,逆变器工作在恒定有功功率控制模式下,用一个时间常数为 $T_{p\_ord}$ 的一阶惯性环节来模拟有功功率指令的下达过程中的通讯延时。对逆变器的有功控制指令进行限幅,上限是当前辐照度下的最大输出功率 $P_m$ ,限幅环节的下限是0。同时,对有功功率

指令的变化率进行限制,上升变化率的上限为 $dP_{ord\_max}$ ,下降变化率的下限为 $dP_{ord\_min}$ 。

[0082] 选定有功类控制模型后,可以得到有功功率参考值 $P_{ref}$ 。

[0083] 在最大功率跟踪模式下,有功功率参考值 $P_{ref}$ 如下式所示:

$$[0084] \quad \begin{cases} P_{ref} = P_m \cdot \frac{1}{1 + sT_{mpp}} \\ dP_{m\_min} \leq \frac{P_{ref}(i) - P_{ref}(i-1)}{dt} \leq dP_{m\_max} \end{cases} \quad (1)$$

[0085] 式中, $P_m$ 表示光伏方阵的最大输出功率, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_{mpp}$ 表示最大功率跟踪时间常数, $P_{ref}(i-1)$ 、 $P_{ref}(i)$ 分别表示第 $i-1$ 和 $i$ 个时刻的有功功率参考值, $dt$ 表示第 $i-1$ 和 $i$ 时刻之间的时间间隔, $dP_{m\_max}$ 和 $dP_{m\_min}$ 分别表示最大功率跟踪斜率上限和最大功率跟踪斜率下限;

[0086] 在恒定有功功率控制模式下,有功功率参考值 $P_{ref}$ 如下式所示:

$$[0087] \quad \begin{cases} P_{ref} = P_{ord} \cdot \frac{1}{1 + sT_{p\_ord}} \\ 0 \leq P_{ref} \leq P_m \\ dP_{ord\_min} \leq \frac{P_{ref}(i) - P_{ref}(i-1)}{dt} \leq dP_{ord\_max} \end{cases} \quad (2)$$

[0088] 式中, $P_{ord}$ 表示上级控制器下发的有功控制指令, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_{p\_ord}$ 表示通讯延时时间常数, $P_m$ 表示光伏方阵的最大输出功率, $P_{ref}(i-1)$ 、 $P_{ref}(i)$ 分别表示第 $i-1$ 和 $i$ 个时刻的有功功率参考值, $dt$ 表示第 $i-1$ 和 $i$ 时刻之间的时间间隔, $dP_{ord\_max}$ 和 $dP_{ord\_min}$ 分别表示有功控制斜率上限和有功控制斜率下限。

[0089] 由于测量采样环节存在测量延时,光伏逆变器的有功功率 $P$ 经过一个时间常数为 $T_m$ 的一阶惯性环节后,得到有功功率测量值 $P_{mea}$ 进入有功功率控制器。将有功功率参考值和测量值的差值 $P_{ref} - P_{mea}$ 作为比例积分PI调节器的输入,PI调节器的输出经过限幅环节后得到有功电流指令 $I_{p\_cmd}$ 。

[0090] 有功功率测量值 $P_{mea}$ 如下式所示:

$$[0091] \quad P_{mea} = \frac{1}{1 + sT_m} \cdot P \quad (3)$$

[0092] 式中, $P$ 表示逆变器的有功功率, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_m$ 表示测量时间常数;

[0093] 有功电流指令 $I_{p\_cmd}$ 如下式所示:

$$[0094] \quad I_{p\_cmd} = (P_{ref} - P_{mea}) \cdot K_p \left(1 + \frac{1}{sT_p}\right) \quad (4)$$

[0095] 式中, $K_p$ 表示比例积分PI调节器的比例常数, $T_p$ 表示比例积分PI调节器的积分常数, $P_{ref}$ 表示有功功率参考值, $s$ 表示传递函数中复变量, $P_{mea}$ 表示有功功率测量值;

[0096] 所述有功电流指令 $I_{p\_cmd}$ 的约束条件如下式所示:

$$[0097] \quad I_{pmin} \leq I_{p\_cmd} \leq I_{pmax} \quad (5)$$

[0098] 式中, $I_{pmax}$ 表示逆变器的最大有功电流值, $I_{pmin}$ 表示逆变器的最小有功电流值。

[0099] 无功类控制模型通过标志位 $Q\_flag$ 设定逆变器的无功类控制模式,分别为恒定功率因数控制模式和恒定无功功率控制模式。当 $Q\_flag$ 设定为0时,逆变器工作在恒定功率因

数控制模式下。逆变器的功率因数指令 $PF_{ord}$ 转换为无功功率指令,转换公式为:

$$[0100] \quad Q_{ord} = \frac{\sqrt{1 - PF_{ord}^2}}{PF_{ord}} \quad (6)$$

[0101] 当 $Q_{flag}$ 设定为1时,逆变器工作在恒定无功功率控制模式下,用一个时间常数为 $T_{q\_ord}$ 的一阶惯性环节来模拟无功功率指令的下达过程中的通讯延时。

[0102] 对无功功率指令的变化率进行限制,上升变化率的上限为 $dQ_{ord\_max}$ ,下限为 $dQ_{ord\_min}$ 。选定无功类控制模式后,可以得到无功功率参考值 $Q_{ref}$ 。

[0103] 在所述恒定功率因数模式下,无功功率参考值 $Q_{ref}$ 如下式所示:

$$[0104] \quad \begin{cases} Q_{ref} = \frac{\sqrt{1 - PF_{ord}^2}}{PF_{ord}} \cdot \frac{1}{1 + sT_{q\_ord}} \\ dQ_{ord\_min} \leq \frac{Q_{ref}(i) - Q_{ref}(i-1)}{dt} \leq dQ_{ord\_max} \end{cases} \quad (7)$$

[0105] 式中, $PF_{ord}$ 表示上级控制器下发的功率因数控制指令, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_{q\_ord}$ 表示通讯延时时间常数, $Q_{ref}(i-1)$ 、 $Q_{ref}(i)$ 分别表示第 $i-1$ 和 $i$ 个时刻的无功功率参考值, $dt$ 表示第 $i-1$ 和 $i$ 时刻之间的时间间隔, $dQ_{ord\_max}$ 和 $dQ_{ord\_min}$ 分别表示无功控制斜率上限和无功控制斜率下限;

[0106] 在所述恒定无功功率模式下,无功功率参考值 $Q_{ref}$ 如下式所示:

$$[0107] \quad \begin{cases} Q_{ref} = Q_{ord} \cdot \frac{1}{1 + sT_{q\_ord}} \\ dQ_{ord\_min} \leq \frac{Q_{ref}(i) - Q_{ref}(i-1)}{dt} \leq dQ_{ord\_max} \end{cases} \quad (8)$$

[0108] 式中, $Q_{ord}$ 表示上级控制器下发的无功功率控制指令, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_{q\_ord}$ 表示通讯延时时间常数, $Q_{ref}(i-1)$ 、 $Q_{ref}(i)$ 分别表示第 $i-1$ 和 $i$ 个时刻的无功功率参考值, $dt$ 表示第 $i-1$ 和 $i$ 时刻之间的时间间隔, $dQ_{ord\_max}$ 和 $dQ_{ord\_min}$ 分别表示无功控制斜率上限和无功控制斜率下限。

[0109] 由于测量采样环节存在测量延时,光伏逆变器的无功功率 $Q$ 经过一个时间常数为 $T_m$ 的一阶惯性环节后变成无功功率测量值 $Q_{mea}$ 进入控制器。

[0110] 无功功率测量值 $Q_{mea}$ 如下式所示:

$$[0111] \quad Q_{mea} = \frac{1}{1 + sT_m} \cdot Q \quad (9)$$

[0112] 式中, $Q$ 表示逆变器的有功功率, $s$ 表示传递函数中复变量, $T_m$ 表示测量时间常数;

[0113] 无功功率参考值和测量值的差值 $Q_{ref} - Q_{mea}$ 作为比例积分PI调节器的输入,PI调节器的输出经过限幅环节后得到无功电流指令 $I_{q\_cmd}$ 。

[0114] 无功电流指令 $I_{q\_cmd}$ 如下式所示:

$$[0115] \quad \begin{cases} I_{q\_cmd} = (Q_{ref} - Q_{mea}) * K_q \left(1 + \frac{1}{s * T_q}\right) \\ I_{qmin} \leq I_{q\_cmd} \leq I_{qmax} \end{cases} \quad (10)$$

[0116] 其中, $K_q$ 为PI调节器的比例常数, $T_q$ 为PI调节器的积分常数, $I_{qmax}$ :逆变器在无功类

控制模式下的最大无功电流值,  $I_{qmin}$ : 在无功类控制模式下逆变器的最小无功电流值。

[0117] 所述有功电流和无功电流的上下限值由电流限制标志位PQ\_flag决定。当PQ\_flag为0时, 电流限幅为无功优先模式, 限值的计算公式为

$$[0118] \quad \begin{cases} I_{qmax} = I_{max} \\ I_{qmin} = -I_{max} \\ I_{pmax} = \sqrt{I_{max}^2 - I_{q\_cmd}^2} \\ I_{pmin} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

[0119] 当PQ\_flag为1时, 电流限幅为有功优先模式, 限值的计算公式为

$$[0120] \quad \begin{cases} I_{pmax} = I_{max} \\ I_{pmin} = 0 \\ I_{qmax} = \sqrt{I_{max}^2 - I_{p\_cmd}^2} \\ I_{qmin} = -\sqrt{I_{max}^2 - I_{p\_cmd}^2} \end{cases} \quad (12)$$

[0121] 其中,  $I_{max}$ 为逆变器的最大电流值,  $I_{qmax}$ 为逆变器的最大无功电流值,  $I_{qmin}$ 为逆变器的最小无功电流值,  $I_{pmax}$ 为逆变器的最大有功电流值,  $I_{pmin}$ 为逆变器的最小有功电流值。

[0122] 故障穿越控制及保护模型包括故障穿越控制模型和保护模型, 如图3所示,

[0123] 根据国家标准GB/T 19964-2012的要求, 大型光伏发电系统应具备低电压穿越能力, 且在电网电压跌落过程中提供无功电流支撑。在逆变器机电暂态模型中, 故障穿越控制环节描述逆变器在电网故障及恢复过程中的暂态特性, 保护环节模拟逆变器的过/欠压、过/欠频保护控制特性。

[0124] 当逆变器的交流侧端电压 $U_{term}$ 的幅值在正常运行区间( $U_{LV1}$ ,  $U_{HV1}$ )时, 故障穿越控制环节的有功/无功电流等于有功/无功电流指令 $I_{p\_cmd}$ 、 $I_{q\_cmd}$ 。其中,  $U_{LV1}$ 为低电压穿越控制的电压阈值,  $U_{HV1}$ 为高电压穿越控制的电压阈值。

[0125] 当交流侧端电压 $U_{term}$ 低于低电压穿越控制的电压阈值 $U_{LV1}$ 时, 逆变器进入低电压穿越控制模式。故障穿越控制环节将根据电压跌落的深度计算有功电流和无功电流, 其中, 有功电流保持为恒定值; 无功电流与电压跌落深度成线性关系, 电压跌落越深, 无功电流越大, 并对无功电流进行限幅, 防止逆变器过流。有功电流和无功电流的计算公式为

$$[0126] \quad I_p = \begin{cases} I_{p\_cmd} & (U_{LV1} < U_{term} < U_{HV1}) \\ I_{p\_FRT} & (U_{term} \leq U_{LV1}) \end{cases} \quad (13)$$

$$I_q = \begin{cases} I_{q\_cmd} & (U_{LV1} < U_{term} < U_{HV1}) \\ \min(K_{q\_LV}(U_{LV1} - U_{term}) + I_{q0\_LV}, I_{qmax\_LV}) & (U_{term} \leq U_{LV1}) \end{cases}$$

[0127] 其中,  $I_{p\_FRT}$ 为逆变器在低电压穿越和零电压穿越控制的有功电流值,  $K_{q\_LV}$ 为低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流支撑系数,  $I_{q0\_LV}$ 为低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流初始值,  $I_{qmax\_LV}$ 为低电压穿越和零电压穿越控制的无功电流最大值。

[0128] 当故障清除后, 逆变器将逐渐恢复至故障前的正常运行状态。在故障恢复过程, 对逆变器的有功电流上升速率进行限制, 上限值为 $dI_{p\_LV}$ 。

[0129] 保护环节是对逆变器的保护控制逻辑的模拟,当逆变器出现过/欠压、过/欠频且持续时间超过整定值时,逆变器的保护动作,逆变器退出运行防止损坏。其中,保护环节的分为一级欠压保护、二级欠压保护、一级过压保护、二级过压保护、一级欠频保护、二级欠频保护、一级过频保护、二级过频保护,具体的保护策略逻辑为:

[0130] 设定保护信号trip\_flag初始值为0,当下述任一事件发生时,trip\_flag为1,触发逆变器保护动作,逆变器不再输出电流,退出运行:

[0131] 1)若 $U_{LVP2} \leq U_{term} \leq U_{LVP1}$ 且持续时间超过 $t_{LVP1}$ ,一级欠压保护动作,trip\_flag=1;

[0132] 2)若 $U_{term} \leq U_{LVP2}$ 且持续时间超过 $t_{LVP2}$ ,二级欠压保护动作,trip\_flag=1;

[0133] 3)若 $U_{HVP1} \leq U_{term} \leq U_{HVP2}$ 且持续时间超过 $t_{HVP1}$ ,一级过压保护动作,trip\_flag=1;

[0134] 4)若 $U_{HVP2} < U_{term}$ 且持续时间超过 $t_{HVP2}$ ,二级过压保护动作,trip\_flag=1;

[0135] 5)若 $f_{LFP1} \leq f \leq f_{LFP2}$ 且持续时间超过 $t_{LFP1}$ ,一级欠频保护动作,trip\_flag=1;

[0136] 6)若 $f < f_{LFP2}$ 且持续时间超过 $t_{LFP2}$ ,二级欠频保护动作,trip\_flag=1;

[0137] 7)若 $f_{HFP1} \leq f \leq f_{HFP2}$ 且持续时间超过 $t_{HFP1}$ ,一级过频保护动作,trip\_flag=1;

[0138] 8)若 $f_{HFP2} < f$ 且持续时间超过 $t_{HFP2}$ ,二级过频保护动作,trip\_flag=1;

[0139]  $U_{LVP1}$ :一级欠压保护整定电压, $t_{LVP1}$ :一级欠压保护动作时间, $U_{LVP2}$ :二级欠压保护整定电压, $t_{LVP2}$ :二级欠压保护动作时间, $U_{HVP1}$ :一级过压保护整定电压, $t_{HVP1}$ :一级过压保护动作时间, $U_{HVP2}$ :二级过压保护整定电压, $t_{HVP2}$ :二级过压保护动作时间, $f$ :电网频率, $f_{LFP1}$ :一级欠频保护整定频率, $t_{LFP1}$ :一级欠频保护动作时间, $f_{LFP2}$ :二级欠频保护整定频率, $t_{LFP2}$ :二级欠频保护动作时间, $f_{HFP1}$ :一级过频保护整定频率, $t_{HFP1}$ :一级过频保护动作时间, $f_{HFP2}$ :二级过频保护整定频率, $t_{HFP2}$ :二级过频保护动作时间。

[0140] 建立输出电流模型计算输出电流,将逆变器电流注入至电网模型中,输出电流计算环节如图4所示。输出电流计算环节是逆变器模型接入电网模型的接口,其功能是将有功电流和无功电流转换为相量形式,并将电流相量注入至电网模型中。输出电流计算环节的输入量分别为交流侧端电压相量 $\dot{U}_{term}$ ,有功电流 $I_p$ 和无功电流 $I_q$ ,输出量为电流相量 $\dot{I}_{ac}$ 。输出电流的计算采用复数运算形式,包含幅值和相位角,具体计算公式为:

$$[0141] \quad \dot{I}_{ac} = \left( \frac{\dot{U}_{term} \left[ I_p - j I_q \right]}{\dot{U}_{term}} \right)^* \quad (14)$$

[0142] 式中, $\dot{U}_{term}$ :交流侧端电压相量, $I_p$ :有功电流, $I_q$ :无功电流, $j$ :虚数单位。

[0143] 图5所示为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型的仿真环境,在逆变器前和后分别设置测量点1和测量点2,通过测量点提供的数据实现基于组串式逆变器的光伏电站并网分析。

[0144] 图6和图7所示分别为本发明的组串式光伏逆变器机电暂态模型在大功率工况下仿真值与实际测量值的对比示意图,和小功率工况下仿真值与实际测量值的对比示意图,由图可以看出仿真值与测量值接近重合,可得出本发明的机电暂态模型能够准确模拟组串式逆变器在受到扰动和遭遇故障时的动态响应外特性。

[0145] 以上仅为本发明的实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均包含在申请待批的本发明的权利要求范围之内。

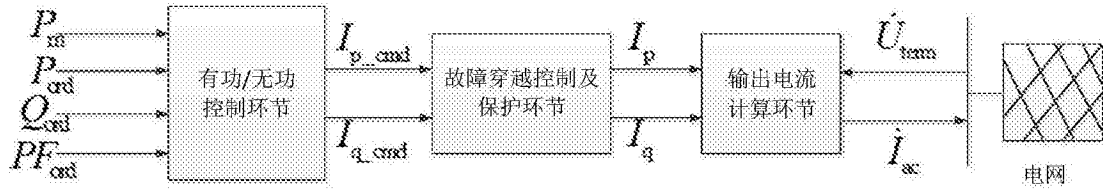


图1

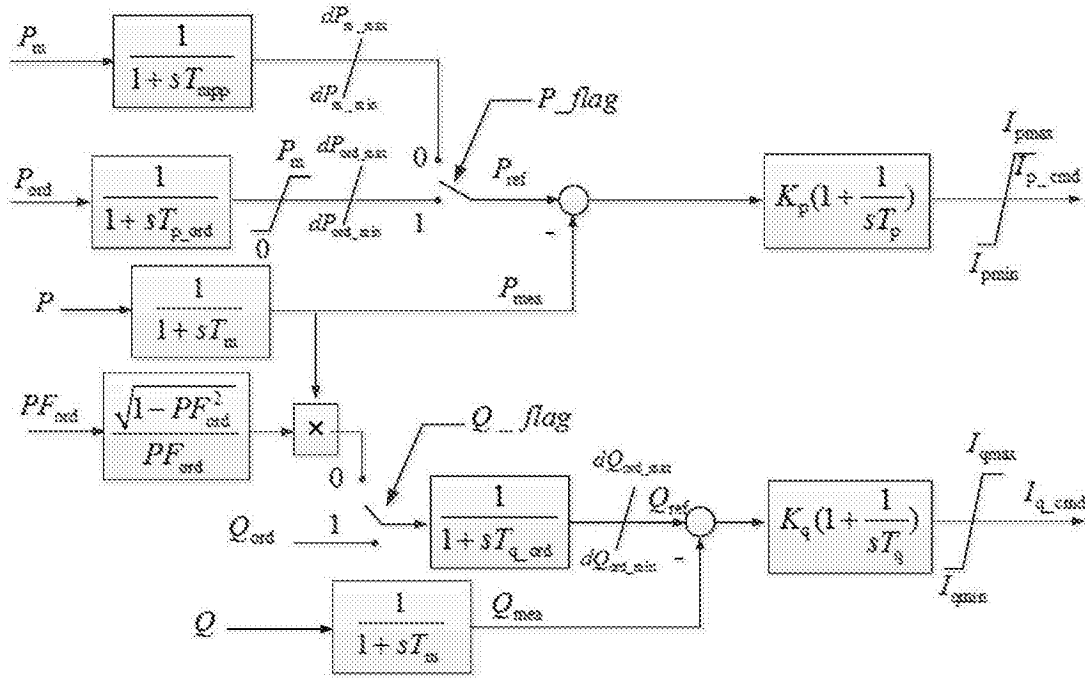


图2

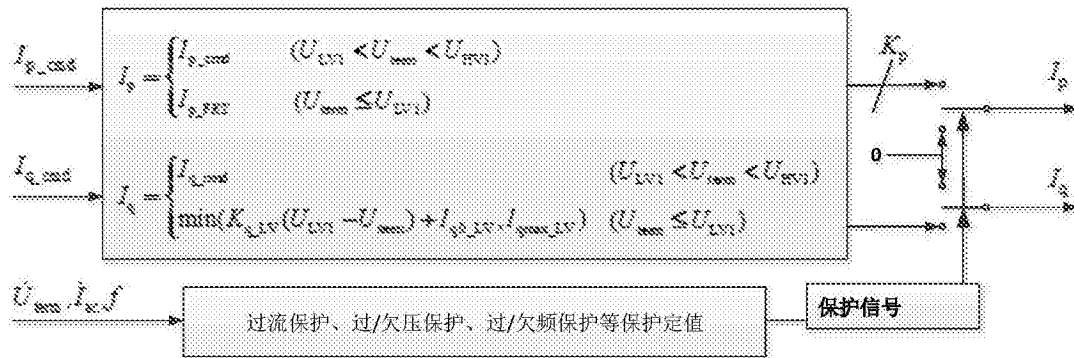


图3

$$\dot{I}_{ac} = \left( \frac{|\dot{U}_{term}| \cdot I_p - j|\dot{U}_{term}| \cdot I_q}{\dot{U}_{term}} \right)^*$$

图4

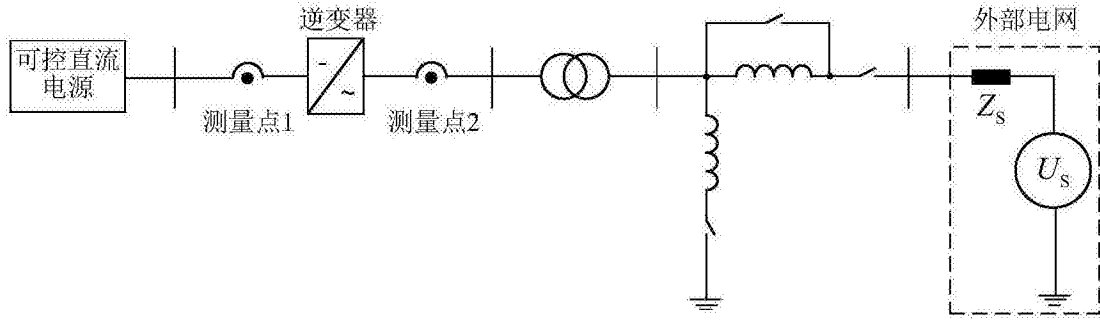


图5

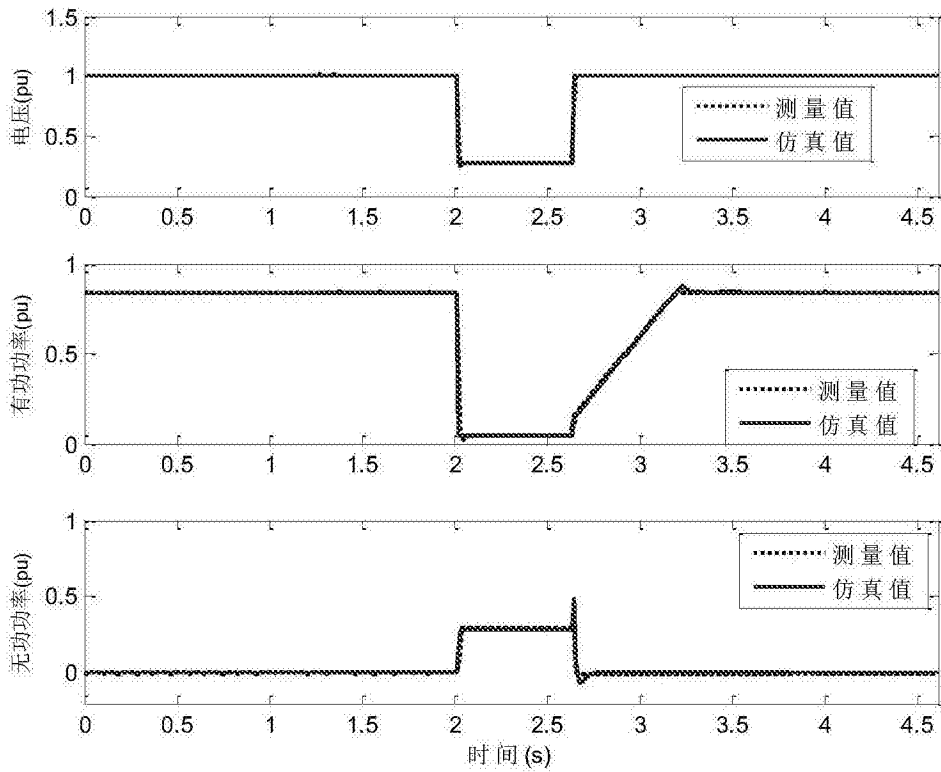


图6



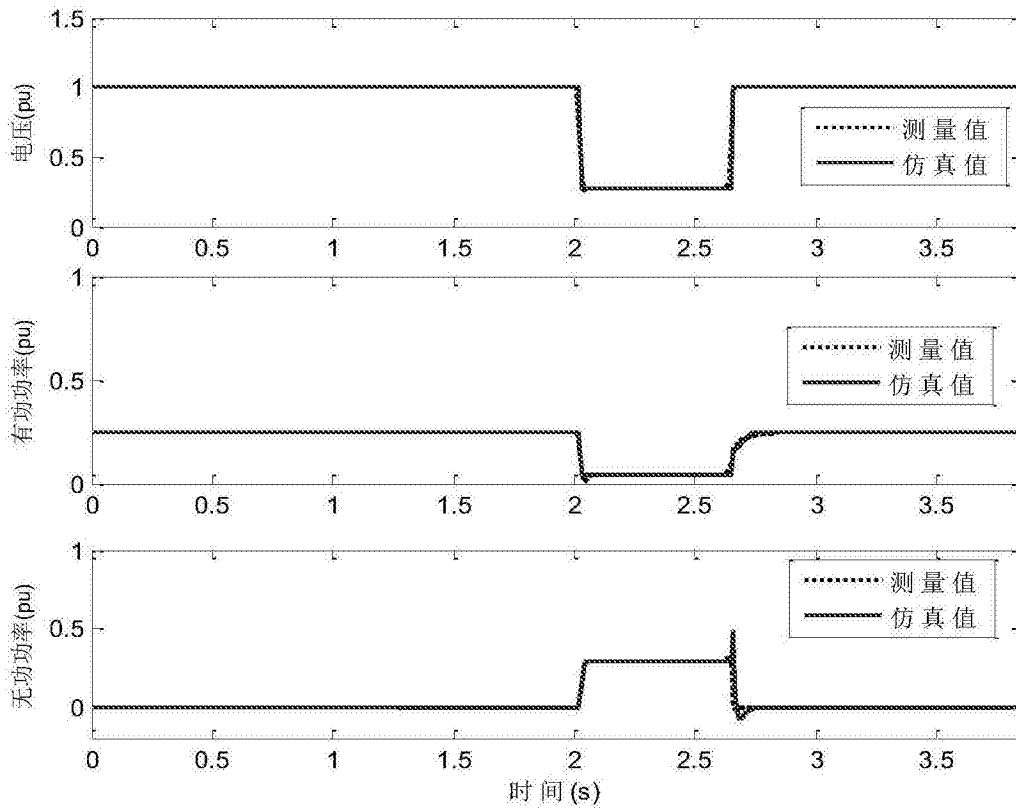


图7