

DOI: 10.7667/PSPC160639

基于功率解耦控制的并网光伏发电系统机电暂态模型

薛峰¹, 蔡云峰¹, 徐宁², 孟屹华¹

(1. 国网苏州供电公司, 江苏 苏州 215004; 2. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 提出了一种新的适用于电力系统机电暂态仿真的并网光伏发电系统模型。从光伏发电系统稳态潮流模型出发, 兼顾电力系统机电暂态仿真要求和现有光伏电磁暂态模型建模特点, 将光伏输出的功率近似解耦, 用滤波电路两端的电压相角差、逆变器调制比分别计算并网有功、无功输出, 模拟光伏发电系统在稳态和暂态过程中的内外部特性。在电力系统综合分析程序(Power System Analysis Software Package, PSASP)的UD模块中建立模型, 通过在光照、电网故障扰动情况下的仿真结果和PSASP自带光伏模型的结果进行对比, 验证所建模型的正确性。该模型不但考虑了无功控制, 还具有封装性好、计算速度快等优点, 对大型光伏接入发电系统的暂态稳定分析具有较好的适应性, 可以在大规模光伏并网的相关研究方面提供有效的支持与借鉴。

关键词: 并网光伏发电系统; 机电暂态仿真; 功率解耦; 暂态稳定

Mechanical and magnetic transient model of grid-connected photovoltaic system based on power decoupling control

XUE Feng¹, CAI Yunfeng¹, XU Ning², MENG Yihua¹

(1. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: This paper presents a novel mechanical and magnetic model of the grid-connected photovoltaic system. Taking requirements and characteristics of present photovoltaic (PV) electromagnetic transient model into account, and taking the theory of power flow calculation as starting point, this paper approximately decouples the output power of the PV system, and uses the phase angle difference between the two ends of the filter and the modulation of the inverter to calculate the active and reactive power respectively, by which simulates the characteristics of the PV system in steady or transient processes. The model is developed in the commercial software package Power System Analysis Software Package (PSASP), and is compared with the PV model in PSASP, considering the disturbance of illumination and three-phase grounding fault in the grid, to validate the accuracy of the model. The simulated results demonstrate that the proposed model is correct, efficient and well encapsulated, which is suitable for the transient stability analysis of a network containing a grid-connected PV model and provides reference for the research of large scale grid-connected PV generation system.

Key words: grid-connected photovoltaic system; mechanical and magnetic transient simulation; power decoupling; transient stability

0 引言

为了从根本上解决传统能源枯竭和环境污染问题, 越来越多的人逐渐把目光转向新能源发电系统的研究和应用^[1-3]。光伏作为一种能量巨大、清洁无污染的能源形式, 已经被广泛地接纳到电网中。但由于其波动性、不确定性以及通过逆变器控制并网等特性, 光伏在给电网带来能源补充同时也造成一

定程度的影响, 当系统处于不正常运行状态或故障暂态情况下影响更为明显。

目前, 针对适用于电力系统机电暂态仿真的并网光伏发电系统模型的研究, 已有部分学者进行了探索^[4-5], 但技术尚未成熟。国内外大量文献对光伏发电系统的内部元件模型以及控制策略进行了研究^[6-12], 而对适用于大规模复杂电网机电暂态仿真的光伏发电系统模型研究仍旧较少。文献[13]提

出采用 Matlab-PSASP 混合仿真的方式来进行光伏接入电网的计算,用 Matlab 搭建光伏开关函数模型,通过 PSASP 接口并入电网进行暂态稳定性分析,但文中的电磁-机电混合仿真不仅会在数据交互上存在转换误差,还会大大降低仿真效率。文献[14]提出了一种基于外环电压、内环电流控制策略的光伏发电系统准稳态模型,提高了仿真效率,但仅仅对 d 轴电流进行控制,未考虑光伏发电系统自身可能具备的无功发电的能力,因此有一定局限性。文献[15]提出了一种通用的光伏发电系统机电暂态模型,加入了 q 轴电流的控制模块,使模型更加完整,但其内部控制系统较复杂,所需的仿真步长(1 ms)相较于电网机电暂态仿真要求的步长(10 ms)也短很多,因此该模型仍不能称为真正意义上的机电暂态模型。文献[16]在传统潮流模型的基础上进行了简化,定性地分析了有功、无功解耦控制过程,但需要实时采集光伏直流母线的电压进行计算,模型作为整体进行仿真时封装性并不好。

从电力系统机电暂态研究对仿真目标、仿真步长以及采样数据上看,实际上适用于机电暂态仿真的模型应该是对电磁暂态详细模型的一种简化等效,只保留其核心结构,并利用代数方程对基波向量进行计算,而不再进行求解大量复杂的微分方程,因此从一定意义上来看,机电暂态模型更偏向于稳态潮流模型。本文提出的并网光伏发电系统模型,兼顾电磁暂态模型的解耦控制理论^[3]、潮流中有功传输与相角相关而无功传输与电压幅值相关的传统理论^[17],直流母线电压、并网无功输出分别控制滤波电路两端电压相角差、逆变器调制比,分别进一步计算并网输出的有功、无功,将此负反馈调节系统作为核心控制系统,可有效体现实际光伏系统的有功输出能力和无功输出能力,同时,模拟机电暂态过程中光伏发电系统的内外部特性,可用于光伏发电系统接入地区电网带来的静态和暂态等稳定性问题的研究。利用光照扰动以及电网故障扰动等情况下仿真结果与 PSASP 自带光伏模型的仿真结果进行对比,验证了该模型的正确性。

1 建模的基本思想与假设

目前应用比较广泛的并网光伏发电系统包括:光伏阵列、直流稳压环节、逆变控制环节和功率输出环节^[18]。常用的控制策略主要针对有功功率,分为定功率控制和最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制^[19]。定功率控制主要用于系统调频、调峰等特定情况,实际运行中使用频率较低;MPPT 能够跟踪光伏阵列可输出的最大功率,

并将其全部转换为有功功率输入到电网。由于发电成本的限制,实际运行的并网光伏电源都采用不发无功功率的控制策略,但如果容量足够且条件允许(如:满足微电网和分布式电源系列标准 IEEE 1547 等)情况下,是能够发一定的无功功率来维持局部电网电压稳定和用作无功补偿^[20-23]。因此,同时具有有功和无功功率控制的光伏模型会更完整,更符合实际,本文一律将 MPPT 定义为更广义的最大功率跟踪,即跟踪光伏阵列的最大可输出功率,并将其转换为逆变器并网复功率。

虽然现有大多数并网光伏发电系统的控制目标一致,但控制策略各异,内部结构形式多样,在发电过程中内部变量的变化可能存在差异。含光伏电源的电网机电暂态分析方面,通常更关注光伏电源的外特性,而对其内部具体控制策略并不关注。在保证外特性与实际光伏电源一致的前提下,本文在建模过程中做了如下假设:

- 1) 假设光伏阵列中光伏电池均工作在相同环境下。实际中的光伏电站可能会因为遮挡、个别电池组故障等原因导致输出不平衡,由于此类扰动具有随机性,无法进行精确模拟,但微小不平衡对机电暂态分析结果的影响很小。
- 2) 忽略直流环节、逆变环节和输出环节的功率损耗。光伏发电系统在工作过程中功率损耗的大小会随着扰动的改变而变化,难以进行精确有效的计算模拟,但其所占比重很小,可以忽略。
- 3) 忽略直流环节的高频波动。电力系统机电暂态仿真的步长大约为 10 ms,而直流环节的高频动态响应时间比机电暂态仿真的步长小很多。
- 4) 类似于机电暂态仿真中的大多数发电机模型^[19],本文建立的是一种准稳态模型,适用于三相对称系统的静态和暂态稳定仿真分析。在故障暂态过程中只针对三相短路故障进行仿真分析,可得出相对保守的稳定性结论。

2 并网光伏发电系统的数学模型

并网光伏发电系统数学模型的整体结构可简化为如图 1 所示系统。图中光伏阵列输出功率为 P_{pv} , 出口电压为 U_{pv} , 输出电流为 I_{pv} ; 直流稳压和逆变控制环节采用单级式结构(双级式结构可通过一定方式进行等效转换,将在后文详述),流入直流环节的电流为 I_{dc} , 稳压电容 C 两端电压为 U_{dc} ; 逆变器的输入功率为 S_{pv} , 输出电压为 $U_i \angle \theta_v$, 复功率为 \tilde{S}_i ; 逆变器通过 RL 滤波器并网,并网复功率为 \tilde{S}_s , 有功功率为 P , 无功功率为 Q , 输出电流为 i , 并

网点电压为 $U_s \angle \varphi_v$ 。

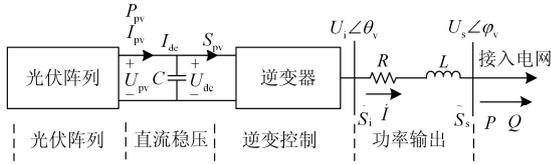


图1 并网光伏模型整体结构

Fig. 1 Whole structure of grid-connected PV model

2.1 光伏阵列数学模型

在研究光伏发电系统外特性而非光伏阵列内部特性时,可直接用大容量的光伏电池模拟整个阵列^[9]。而光伏电池通常采用工程中通用的光伏电池模型进行模拟^[10],误差较小,且外特性基本一致,可拟合日照强度 S 和电池板温度 T 变化时的光伏电池输出特性曲线,具有很高的实用价值和计算优势。光伏阵列模型输入为 S 、 T 、阵列出口电压 U_{pv} , 阵列输出电流为 I_{pv} , 其关系可用式(1)一式(3)表示。

$$I_{pv} = f(U_{pv}, S, T) = I_{sc} [1 - C_1 (\exp \frac{U_{pv}}{C_2 U_{oc}} - 1)] \quad (1)$$

$$C_1 = (1 - \frac{I_{mm}}{I_{sc}}) \exp(-\frac{U_{mm}}{U_{oc}}) \quad (2)$$

$$C_2 = (\frac{U_{mm}}{U_{oc}} - 1) [\ln(1 - \frac{I_{mm}}{I_{sc}})]^{-1} \quad (3)$$

式中: I_{mm} , I_{sc} , U_{mm} , U_{oc} 分别为经过实际光照和温度修正的光伏阵列最大功率点电流、短路电流、最大功率点电压、开路电压; I_{sc} , I_{mm} , U_{oc} , U_{mm} 可由式(4)一式(9)得到。

$$I_{sc} = I_{sc} \times \frac{S}{1000} \times (1 + 0.0025\Delta T) \quad (4)$$

$$I_{mm} = I_m \times \frac{S}{1000} \times (1 + 0.0025\Delta T) \quad (5)$$

$$U_{oc} = U_{oc} (1 - 0.003\Delta T) \times \ln(e + 0.5\Delta S) \quad (6)$$

$$U_{mm} = U_m (1 - 0.003\Delta T) \times \ln(e + 0.5\Delta S) \quad (7)$$

$$\Delta S = \frac{S}{1000} - 1 \quad (8)$$

$$\Delta T = T - 25 \quad (9)$$

式中: I_m , I_{sc} , U_m , U_{oc} 分别为标准工况下 ($T = 25^\circ\text{C}$ 、 $S = 1000 \text{ W/m}^2$) 光伏阵列最大功率点电流、短路电流、最大功率点电压、开路电压。

光伏阵列输出功率 P_{pv} 可由式(10)计算。

$$P_{pv} = U_{pv} \times I_{pv} \quad (10)$$

如图2所示,光伏阵列出口处电压从零开始增大,阵列的输出功率则先增大后减小,在大约80%的开路

电压处达到最小;随着光照强度降低,输出的最大功率有所下降,但最大功率点电压变化基本不变。

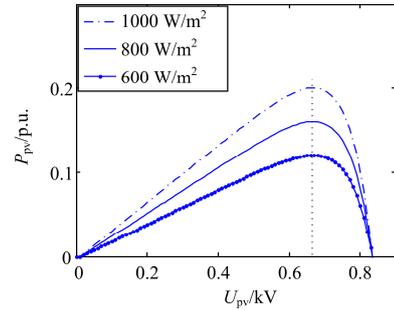


图2 随光照变化光伏阵列输出特性曲线

Fig. 2 Diagram of PV array's output characteristics considering the changing of illumination

2.2 直流稳压环节数学模型

光伏发电系统的直流稳压环节主要起联结光伏阵列与逆变器、减小直流侧电压波动的作用。本文采用的单级式结构如图1所示,图中 $U_{dc} = nU_{pv}$, 而双级式(忽略直流环节高频波动)则可以等效为加入理想的升压环节,即 $U_{dc} = nU_{pv}$ (n 为升压电路的升压比)。将 U_{dc} 作为状态变量,由稳压电容 C 两侧的功率变化列方程得

$$U_{dc} I_{dc} - S_{pv} = C \frac{dU_{dc}}{dt} U_{dc} \quad (11)$$

由于 C 为常数,并且在单级式结构中有

$$I_{dc} = I_{pv} = f(U_{pv}, S, T) = f(U_{dc}, S, T) \quad (12)$$

因此当 U_{dc} 或 S_{pv} 确定时,式(11)就有唯一解,从

物理意义上来讲就是当直流侧电压稳定时,光伏阵列输出的功率和直流环节输入到逆变器的功率平衡。

2.3 逆变控制及功率输出环节数学模型

逆变控制是整个光伏发电系统的核心环节,将光伏阵列发出的直流电转换为适合并网的稳定交流电,由于本模型采用单级式结构,MPPT功能包含在逆变控制中,因此该环节的控制策略和控制参数直接决定并网电能的质量。考虑到机电暂态分析的方式和目标,本模型从光伏发电系统输出的稳态潮流方程入手,对电磁暂态模型进行简化等效,在不改变控制目标 P 和 Q 的前提下,通过调整控制对象和控制方式进行建模。

由于机电暂态仿真是针对扰动后的暂态过程仿真,因此在理论上初始状态是稳定平衡的,且目标稳定状态是确定的:对于外部网络的扰动,光伏模型自身的参数和控制策略都未发生变化,所以其目标稳定状态应该与初始状态相同;对于模型内部的扰动,其最终稳定状态也应该是确定的,由于本

文只考虑了光照变化扰动, 随光照变化后总输入功率的下降, 模型假设并网有功无功控制目标也相应地成比例下降。通过以上分析, 最终 P 和 Q 是确定的, 在忽略内部元件功率损耗的假设下, 由式(13)得, S_{pv} 也是确定的。

$$S_{pv} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (13)$$

因此, 由式(11)可得出, 通过控制 U_{dc} 有效地控制 S_{pv} , 进而有效地控制 P 和 Q , 以下为控制策略的具体分析。图1中功率输出环节的 R 、 L 串联部分为滤波电路, 由于实际中的滤波电阻 R 一般很小(否则会影响光伏的有功功率输出), 此处忽略电阻 R , 通过式(14)计算并网节点输出的复功率 \tilde{S}_s , 进一步得到 P 和 Q 。

又由于一般情况下逆变器出口侧电压与电网电压的相角差很小(因为实际电网中的输电线一般呈感性), 也即 δ 较小, 因此 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$, 可得式(15)。

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{S}_s &= \dot{U}_s (i)^* \approx \dot{U}_s \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_s}{j\omega L} \right)^* = \\ &= \frac{U_i U_s \sin \delta}{\omega L} + j \frac{U_s (U_i \cos \delta - U_s)}{\omega L} \quad (14) \\ \delta &= \theta - \varphi \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} P &= \frac{U_i U_s \sin \delta}{\omega L} \approx \frac{U_i U_s \delta}{\omega L} \\ Q &= \frac{U_s (U_i \cos \delta - U_s)}{\omega L} \approx \frac{U_s (U_i - U_s)}{\omega L} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

由式(15)可知, 有功输出 P 主要由滤波电路两端电压相角差 δ 决定, 无功输出 Q 主要由电压幅值差 $U_i - U_s$ 决定。一般情况下 U_s 和 φ 是稳定的, 因此如何控制 U_i 和 θ 成了关键。通过研究发现, 当光伏电源正常工作时, U_{dc} 是稳定的, 则 U_i 完全由逆变器的调制比 M 决定。因此, 本模型用 δ 单独计算 P , 用 M 单独计算 Q , 最终实现了并网光伏发电系统的数学建模。

如图3所示, 模型的无功环控制, 用实时计算的 Q 作为无功环的输入来控制 M , 进而计算出 Q , Q 输出至电网同时反馈到控制回路首端构成负反馈, 控制方程如式(16)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} M &= \left(K_{qp} + \frac{K_{ql}}{s} \right) \times (Q_{ref} - Q) + M_0 \\ U_i &= M \times U_{dc} \\ Q &= \frac{U_s}{\omega L} (U_i - U_s) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

其中: Q_{G0} 为无功初值, 由潮流计算结果确定; Q_{ref}

为无功参考值, 根据目标状态确定; M_0 为调制比初值, 由 Q_{G0} 反算确定; K_{qp} 和 K_{ql} 为无功环的PI调节系数, 根据实际光伏发电系统设定。

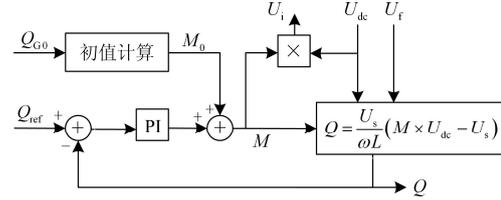


图3 无功控制环框图

Fig. 3 Control block diagram of reactive output power

模型的有功控制环框图如图4所示, 用 U_{dc} 作为有功环的输入来控制 δ , 进而计算 P , 再输出到电网的同时通过式(1)、式(11)、式(13)和式(16)反算出 U_{dc} 构成负反馈, 控制方程如式(17)所示。

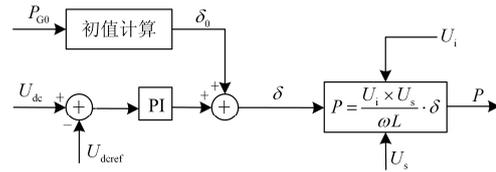


图4 有功控制环框图

Fig. 4 Control block diagram of active output power

$$\left\{ \begin{aligned} \delta &= \left(K_{pp} + \frac{K_{pl}}{s} \right) \times (P_{ref} - P) + \delta_0 \\ P &= \frac{U_i \times U_s}{\omega L} \delta \end{aligned} \right. \quad (17)$$

其中: P_{G0} 为有功初值, 由潮流计算得到; δ_0 为母线电压相角差初值; $U_{dc,ref}$ 为光伏阵列的最大功率点电压; K_{pp} 和 K_{pl} 为有功环的PI调节系数, 根据实际光伏发电系统设定。

本文的MPPT采用改进的定电压控制法, 其他各种控制策略如扰动观察法、电导增量法等, 虽然在跟踪效果上可能优于定电压控制法, 但不影响机电暂态分析中光伏模型的外特性。因此本文模型使 U_{dc} 跟踪经过修正的光伏阵列最大功率点电压 $U_{dc,ref}$, $U_{dc,ref}$ 的表达式如式(18)所示。

$$U_{dc,ref} = U_{mm} \quad (18)$$

以上分别给出了光伏发电系统的光伏阵列、直流稳压环节、逆变控制环节和功率输出环节的数学模型, 其构成了可用于电力系统机电暂态分析的光伏发电系统暂态模型。模型的输入参数为 S , T 以及 I_m , I_{sc} , U_m , U_{oc} , 适合各种机电暂态仿真分析程序(包括: PSASP、BPA等)通过嵌入的方式加载使用。模型的整体框图如图5所示。

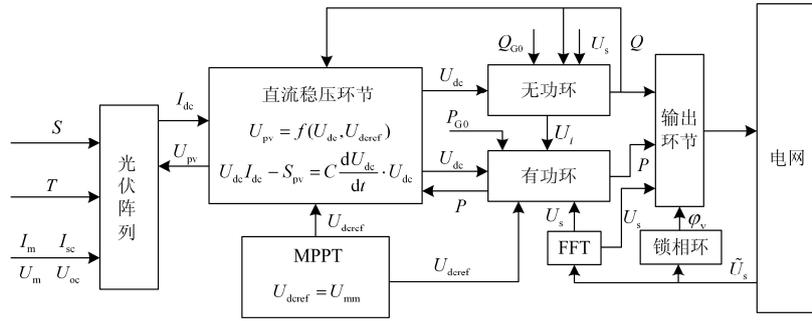


图5 光伏模型整体框图

Fig. 5 Schematic diagram of the whole PV model

3 并网光伏发电系统模型的 PSASP 实现

在 PSASP 的用户自定义(User Determined, UD)模块中实现了本文所建立的光伏电源模型。UD 模块在暂态稳定计算中为自定义发电机模型与电网交互计算提供的接口数据为并网点母线电压幅值 U_s 和相角 ϕ_v ，以及发电机输出的电流实部 I_{TR} 和虚部 I_{TI} ，模型的接口数据交互示意图如图 6 所示。

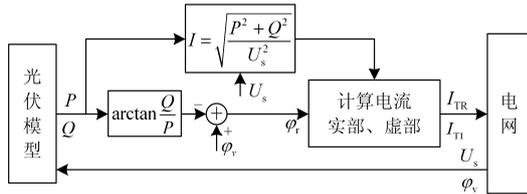


图6 光伏模型接口数据交互示意图

Fig. 6 Diagram for interface data between PV model and the host utility

4 仿真分析

为验证光伏电源数学模型的正确性，将其与 PSASP 自带的光伏模型进行仿真比较，通过 PSASP 建立标准 7 节点交流系统，采用 10 ms 的仿真步长，仿真时间为 8 s，算例中分别考虑了光照扰动特性和电网短路故障扰动特性。仿真电路如图 7 所示。

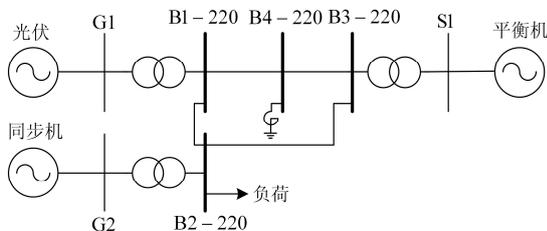


图7 PSASP 标准 7 节点系统

Fig. 7 Single line schematic diagram of a standard 7 nodes grid-connected topology in PSASP

由于 PSASP 模型未考虑无功的控制，为了有利于比较，本文首先仿真功率因数为 1 的情况，最后单独给出一组功率因数为 0.8 的仿真结果。图 7 中，G1 母线为 PQ 结点，与光伏发电机相连， $P=20$ MW， $Q=0$ Mvar 或 5 Mvar (功率因数为 0 或 0.8)，电压为 0.4 kV；G2 母线为 PV 节点，与同步发电机相连， $P=2500$ MW，电压为 18 kV；S1 为平衡节点，电压为 35 kV；其余母线都为 220 kV 母线；全网总负荷 $P=300$ MW；B4-220 母线上接并联电抗器。该系统中光伏发电所占比重比较小，较符合实际电网的情况。模型内部采用标幺值， $S_B = 100$ MVA。

4.1 光照扰动特性仿真

输出功率因数为 1 时，考虑光照扰动下的输出特性，初始光照强度 $S=1000$ W/m²，1 s 后 S 开始下降，3 s 时 S 下降到 500 W/m²，3~5 s 内 S 稳定在 500 W/m²，5 s 后 S 开始上升，7 s 时 S 又上升到 1000 W/m²，7~8 s 内 S 稳定在 1000 W/m²，仿真结果如图 8 所示。

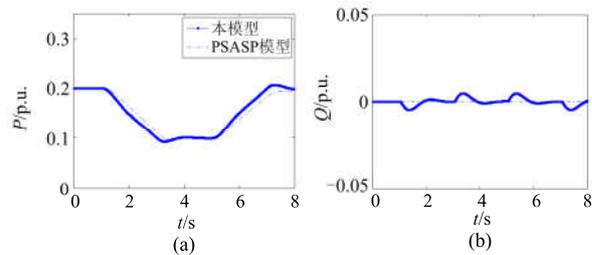


图8 光照扰动下光伏系统输出特性

Fig. 8 PV system's output characteristics under the disturbance of illumination

从仿真结果看出，本光伏模型的有功输出能快速跟踪光照变化，结果曲线与 PSASP 自带模型曲线接近，无功功率在光照突变时会有小幅振荡，较符合实际。

4.2 电网短路故障扰动特性

当输出功率因数为 1 且 $S=1000$ W/m²、 $T=25^\circ\text{C}$

时, 比较当光伏电源出口处B1-220母线发生严重三相短路接地故障时的内外部特性。

4.2.1 0.1 s 切除故障(稳定)

1 s 时发生故障, 1.1 s 切除故障, 光伏阵列输出特性曲线如图 9 所示, 模型出口母线电压、系统频率、有功和无功功率的计算结果如图 10 所示。

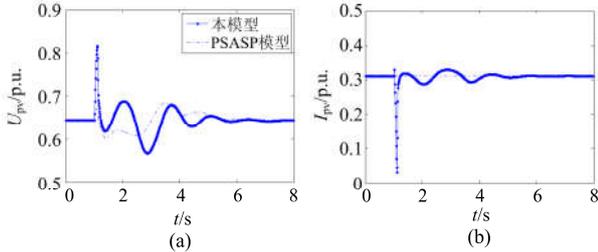


图 9 电网 0.1 s 切除故障光伏阵列输出特性

Fig. 9 Output characteristics of PV array when the fault in the grid is cleared in 0.1 s

由图 9 可以看出, 故障期间光伏电源的功率无法输出, 导致两模型的直流侧电压都有所上升, 经过小幅波动后回到稳态; 对比光伏阵列输出电流, 从图 2 可以看出, 由于初始工作点应该在最大功率点处, 因此电流应该随电压的上升而明显下降, 自带模型一直未有明显波动, 而本模型的电流在明显下降后经过小幅振荡回到稳态, 更符合实际。

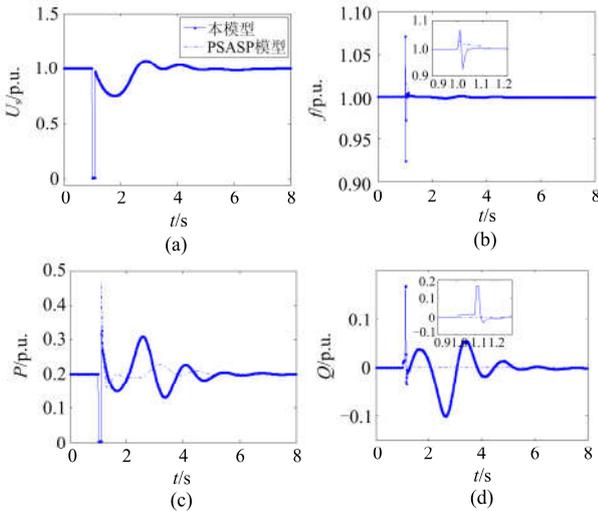


图 10 电网 0.1 s 切除故障光伏系统输出特性

Fig. 10 PV system's output characteristics when the fault in the grid is cleared in 0.1 s

由图 10 可以看出, 两模型对出口母线电压幅值和有功功率的影响基本一致, 在故障期间大幅下降, 在故障切除后经过大约 5 s 左右的小幅振荡后恢复稳定, 两模型有功功率曲线的差异主要是由于内部控制系统和 PI 参数的差异, 并且实际中机电暂态分析并不关注于波形的具体特征。模型对于系统频率

特性的影响也基本一致, 在故障切除后快速恢复稳定。对于无功功率, 自带模型的无功功率在整个暂态过程中一直为零, 不能有效体现光伏发电系统在暂态过程中无功功率的变化, 有一定局限性; 而本模型考虑了无功控制环节, 从 0.9~1.3 s 的局部放大图看出, 由于母线电压明显下降, 需要大量的无功支持, 此时光伏输出一定量的无功功率, 此无功虽然不足以保证母线电压不跌落, 但如果模型容量足够, 可以给母线电压提供一定的支持作用, 在故障切除后无功经过振荡恢复到稳定, 更符合实际。

4.2.2 0.12 s 切除故障(失稳)

如果 1.12 s 切除故障, 光伏阵列输出特性曲线如图 11 所示, 光伏发电系统出口母线电压、系统频率、有功功率和无功功率的计算结果如图 12 所示。

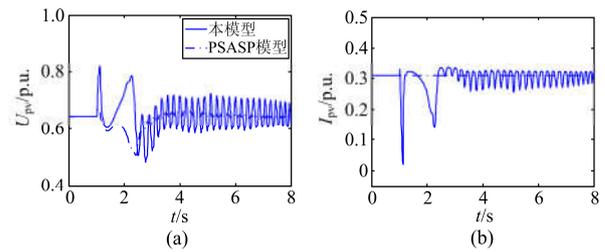


图 11 电网 0.12 s 切除故障光伏阵列输出特性

Fig. 11 Output characteristics of PV array when the fault in the grid is cleared in 0.12 s

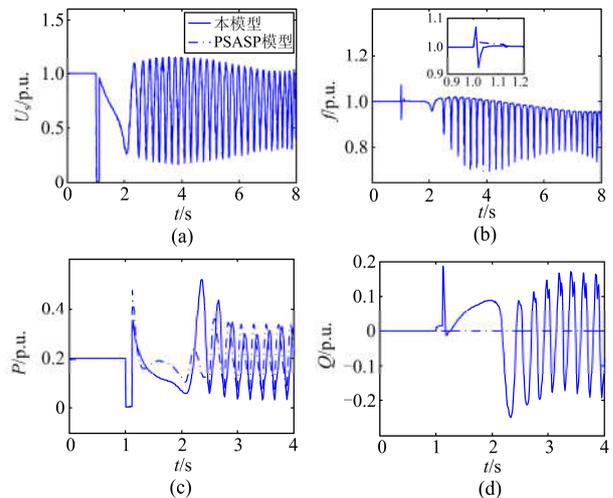


图 12 电网 0.12 s 切除故障光伏系统输出特性

Fig.12 Output characteristics of PV system when the fault in the grid is cleared in 0.12 s

如图 11、图 12 所示, 两模型的内外部特性在故障期间与前文所述相近, 在故障后大约 1 s 时都开始逐渐振荡, 且振荡的整体趋势一致, 最后都无法恢复到稳定状态。从无功功率的局部放大图看出, 在故障后短时间内, 光伏电源尝试发出一定量的无

功, 但由于光伏容量较小, 在网络中渗透率较低, 难以影响系统的稳定性, 因此在故障发生后 1 s 左右系统开始大幅振荡, 无法恢复稳定。

4.3 功率因数为 0.8

以上仿真分析已经充分验证了本文提出的光伏电源数学模型的正确性和实用性, 而由于 PSASP 自带模型不包含无功控制环节, 因此仅提供本文的模型在功率因数为 0.8 时的外特性仿真结果, 初始状态 $P=20\text{ MW}$, $Q=5\text{ Mvar}$ 。

4.3.1 光照扰动特性

初始光照强度 $S=1000\text{ W/m}^2$, 1 s 后 S 开始下降, 3~8 s 内 S 稳定在 500 W/m^2 , 光伏电源输出功率的仿真结果如图 13 所示。

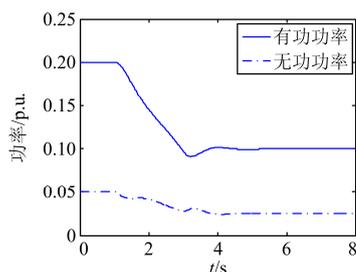


图 13 功率因数为 0.8 时光照扰动仿真结果

Fig. 13 Simulated results of illumination disturbance when the power factor is 0.8

图 13 中随着光照下降到 50%, 光伏电源的有功、无功输出都按比例降为原来的 50%, 且该功率分配比例可根据需要进行控制, 能有效提高光伏电站在光照扰动下的功率调控能力, 进而为局部电网无功电压稳定提供支持, 降低并网点出现电压越限。

4.3.2 电网短路故障扰动分析

当光伏电源出口处 B1-220 母线 1 s 时发生严重三相短路接地故障, 1.1 s 切除故障, 系统稳定, 光伏电源输出功率的仿真结果如图 14 所示。

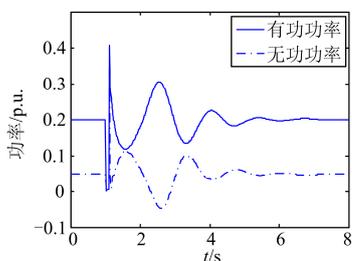


图 14 功率因数为 0.8 时电网 0.1 s 切除故障仿真结果

Fig. 14 Simulated results when the fault in the grid is cleared in 0.1 s while the power factor is 0.8

图 14 中光伏电源在故障后的功率输出特性与上文所述一致, 大约经过 5 s 恢复稳定, 由于是外部故

障, 光伏系统最终回到初始稳定运行状态。

5 结论

本文提出了一种并网光伏发电系统机电暂态模型, 采用功率解耦的控制方法, 仅需利用模型与外部系统接口处的有功、无功、并网点母线电压的幅值和相角就能有效地与电网进行交互计算, 模拟光伏电源的内外部特性, 且通过 PSASP 验证了模型的准确性。模型具有以下突出特点:

1) 模型满足大电网对机电暂态仿真目标、仿真步长、采样数据的要求。

2) 模型封装性好, 控制系统简单, 内部参数易于整定, 数值稳定性好。

3) 相较于电磁暂态模型, 本模型仿真速度快, 且精度满足机电暂态仿真的要求。

4) 相较于 PSASP 自带的光伏模型, 本模型采用完全不同的控制思想, 且加入了无功控制环节, 使模型更完整, 外特性更符合实际系统。

参考文献

- [1] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [2] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [3] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [4] 闫凯, 张保会, 翟继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [5] CARRASCO J M, FRANQUELO L G, BIALASIEWICZ J T, et al. Power electronics systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002-1016.

- [6] OMAN H. Space solar power development[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 15(2): 3-8.
- [7] SCHONARDIE M F, MARTINS D C. Application of the dq0 transformation in the three-phase grid-connected PV systems with active and reactive control[C] // Proceedings of IEEE Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 2008.
- [8] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.
JIAN Zhiqiang, SITU Qin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [9] YAZDANI A. Electromagnetic transients of grid-tied photovoltaic systems based on detailed and averaged models of the voltage-sourced converter[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-8.
- [10] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108-112.
ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 108-112.
- [11] ESRAM T, CHAMPMAN P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 439-449.
- [12] LISERRE M, BLAABJERG F. Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1281-1291.
- [13] DASH P P, KAZERANI M. Dynamic modeling and performance analysis of a grid-connected current-source inverter-based photovoltaic system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 443-450.
- [14] 张巍, 向铁元, 李安, 等. 基于 MATLAB-PSASP 的光伏并网暂态稳定计算模型[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 80-85.
ZHANG Wei, XIANG Tiejuan, LI An, et al. MATLAB-PSASP based transient stability computation model for grid-connection of PV power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 80-85.
- [15] 于卫卫. 基于 PSASP 的光伏发电系统建模与并网分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
YU Weiwei. Modeling and grid-connected analysis of photovoltaic system based on the PSASP[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [16] 孙浩, 张曼, 陈志刚, 等. 并网光伏发电系统的通用性机电暂态模型及其与电磁暂态模型的对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 128-133.
SUN Hao, ZHANG Man, CHEN Zhigang, et al. Comparative study on electromechanical and electromagnetic transient model for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 128-133.
- [17] 张犁, 孙凯, 冯兰兰, 等. 一种模块化光伏发电并网系统[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 26-31.
ZHANG Li, SUN Kai, FENG Lanlan, et al. A modular grid-connected photovoltaic generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 26-31.
- [18] 李乃永, 梁军, 赵义术. 并网光伏电站的动态建模与稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 12-18.
LI Naiyong, LIANG Jun, ZHAO Yishu. Research on dynamic modeling and stability of grid-connected photovoltaic power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 12-18.
- [19] LI Huijuan, XU Yan, ADHIKARI S, et al. Real and reactive power control of a three-phase single-stage PV system and PV voltage stability[C] // Power and Energy Society General Meeting: IEEE, 2012: 1-8.
- [20] 汪海宁, 苏建徽, 丁明, 等. 光伏并网调节系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 75-79.
WANG Haining, SU Jianhui, DING Ming, et al. Photovoltaic grid connected power conditioner system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 75-79.
- [21] TURITSYN K, SULC P, BACKHAUS S, et al. Options for control of reactive power by distributed photovoltaic generators[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1063-1073.
- [22] 唐彬伟, 晁勤, 艾斯卡尔, 等. 基于 PSASP 软件的并网光伏发电系统机电暂态建模[J]. 低压电器, 2013(11): 41-45.
TANG Binwei, CHAO Qin, AISIKAER, et al. Electromechanical transient simulation model for grid-connected photovoltaic power system based on PSASP[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(11): 41-45.
- [23] COELHO R F, CANCER F, MARTINS D C. A proposed photovoltaic module and array mathematical modeling destined to simulation[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Korea: 2009.

收稿日期: 2016-05-06; 修回日期: 2016-08-15

作者简介:

薛峰(1972-), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xf731122@163.com

蔡云峰(1971-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

徐宁(1976-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 魏小丽)