

光伏发电系统暂态建模与等值

闫凯¹, 张保会¹, 瞿继平², 吴兴全²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 随着光伏并网电站的数量增多、容量增大, 其对电网的保护与控制的影响不可忽略。建立光伏发电站的电磁暂态仿真和等值计算模型是研究其并网特性及对继电保护影响的基础。介绍了光伏电站接入电网的常见形式, 建立了一种通过单级式逆变器并网的光伏发电单元模型, 并利用在 PSCAD/EMTDC 上搭建的光伏发电系统电磁暂态仿真模型验证了其在稳态和暂态条件下的有效性。在此基础上, 给出了一种由光伏发电单元组成的光伏电站的等值计算模型, 并仿真验证了其有效性。

关键词: 光伏发电单元; 电磁暂态建模; 等值计算; PSCAD/EMTDC; 仿真验证

Photovoltaic power system transient modeling and equivalents

YAN Kai¹, ZHANG Baohui¹, QU Jiping², WU Xingquan²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Gansu Electric Power Design Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: With the increasing of number and capacity of photovoltaic power stations connected to grid, its impact on the relay protection and control of the power grid can't be ignored. Building the photovoltaic power stations' electromagnetic transient simulation and equivalent calculation model is the basis of the grid-connected characteristics and the influence on relay protection. This paper introduces the common form of photovoltaic power station connected to grid, establishes a photovoltaic power generation unit model based on single-stage inverters, then builds a photovoltaic power generation system electromagnetic transient simulation model on PSCAD / EMTDC to verify its validity in steady and transient conditions. On this basis, the equivalent calculation model of the photovoltaic power plant consisting of photovoltaic power generation unit is given, and its validity is verified by the simulation.

Key words: photovoltaic power generation unit; electromagnetic transient modeling; equivalent calculation; PSCAD/EMTDC; simulation verification

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0001-08

0 引言

在能源和环境问题备受关注的今天, 太阳能以其清洁、可再生的特点在许多国家蓬勃发展。随着太阳能发电技术的进步, 光伏并网发电将成为太阳能利用的重要方式^[1-3]。在我国, 随着并网投运的光伏电站逐渐增多, 光伏系统的整体建模工作与并网特性分析就显得尤为重要。相比于方法已相当成熟的电力系统电磁暂态和机电暂态分析, 针对风能、太阳能等新能源接入电网引起的电网特性问题的分析还有待进一步完善^[4]。因此, 建立完整准确的光伏发电单元模型, 在此基础上精确地研究其内部暂态过程, 分析其并网特性及对继电保护动作特性的影响, 具有非常重要的意义。

目前光伏电站普遍采用容量为 0.5 MW 的逆变

器, 大型光伏电站内通常含有数十个逆变器; 若搭建每个逆变器的详细模型来构成光伏电站模型, 则该模型将十分庞大且占用太多的计算资源。所以如何利用单机模型来等值光伏电站的详细模型有着重要的实际意义。本文在搭建了一个光伏发电单元的电磁暂态仿真模型的基础上, 提出了一种等值方法, 以一个等值光伏发电单元来等值整个光伏电站, 并通过仿真验证了该方法的有效性。

1 光伏电站接入电网的常见形式

1.1 光伏电站主要一次设备

光伏电站主要一次设备有光伏电池阵列、光伏并网逆变器、无功补偿装置和其他常见的电气一次设备。

光伏电池是光伏电站最主要的元件, 其功能是利用光生伏打效应将捕获的太阳能转换成电能。光

伏电池按安装方式可分为固定安装、单轴跟踪和全跟踪三种方式。单轴跟踪和全跟踪比固定安装方式捕获的太阳能更多，但由于安装费用、维护费用以及土地利用等因素的制约，国内光伏电站仍以固定安装方式为主。

单个光伏电池输出的电压和能量都十分低下，故通常将几十个光伏电池封装形成一个光伏组件。光伏组件再通过汇流箱和直流配电柜串并联成一个光伏阵列。

光伏逆变器是光伏电站最为核心的元件，其功能是将光伏阵列输出的直流电能转换成符合电网要求的交流电能。非隔离型逆变器由于其结构简单、质量轻、成本低且具有较高的效率，已成为当前光伏逆变器的主流。目前多采用单级结构的非隔离型逆变器。单级非隔离型逆变器只有一级的DC/AC变换电路，通常为三相全桥结构。光伏阵列的最大功率跟踪控制、逆变器的并网控制及自身保护功能等都包含在逆变器的控制器中。该结构的逆变器具有电路简单、元器件少、可靠性高、效率高、功耗低等诸多优点。

光伏电站一般都配有 SVG 等无功补偿装置，其功能是维持光伏电站内部母线的电压稳定。光伏逆变器通常运行于单位功率因数状态，光伏电站发送有功的波动引起的母线电压偏移必须靠 SVG 发送的无功来补偿。通常 SVG 的容量按照光伏电站装机容量的 20% 来配置。

此外，光伏电站内部其他常见的一次电气设备有变压器、母线、电压电流互感器、避雷器和架空出线等。因与传统电站的配置一致，不在此作详细说明。

1.2 光伏电站电气结构

光伏电站一次接线通常采用单母线或单母线分段的型式。目前国内光伏电站普遍采用 0.5 MW 并网逆变器，两个光伏并网逆变器并联接到阵列变或接到双分裂变压器的两低压侧构成 1 MW 的光伏发电单元，如图 1 所示。

图 1(a)中接线方式 1 结构简单，但某些型号的逆变器不支持直接并联运行；图 1 (b)接线方式 2 中升压变采用双分裂变压器，可以较好地抑制逆变器间的环流。

2 光伏发电单元电磁暂态建模

2.1 光伏电池阵列模型

光伏电池组件的等效电路可以用图 2 所示的结构来描述^[5-6]。忽略漏电阻 R_{sh} ，光伏电池组件的输

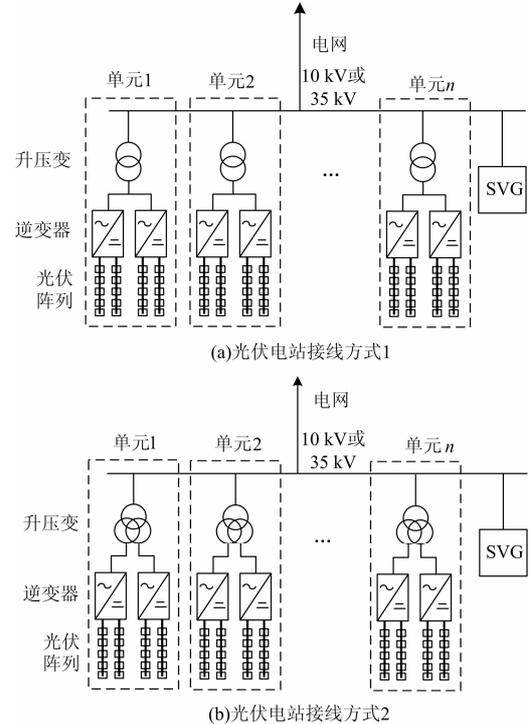


图 1 光伏电站接线方式

Fig. 1 PV power plant wiring

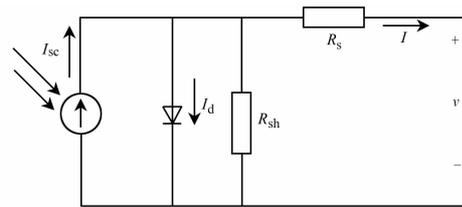


图 2 光伏电池组件等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the photovoltaic modules

出电流表达式为式(1)。

$$I = I_{SC} - I_0 \left(\exp \left(\frac{U + I \cdot R_s}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

式中， I_{SC} 代表光子在光伏电池中激发的电流，它取决于电池的材料与尺寸、辐照度和本体的温度。 I_{SC} 可由式(2)得到。

$$I_{SC} = I_{sref} \cdot \left[\left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + J_{TMP} \cdot (T - T_{ref}) \right] \quad (2)$$

式中： I_{sref} 为标准测试环境(温度 $T_{ref}=25\text{ }^\circ\text{C}$ ，辐照度 $G_{ref}=1\ 000\ \text{W/m}^2$)下光伏电池的短路电流； T 为温度； G 为辐照度； J_{TMP} 为 I_{sc} 的温度系数。

二极管饱和电流 I_0 的表达式为

控制的。

本文采用增量电导法作为 MPPT 算法，其控制框图如图 5 所示^[9-10]。

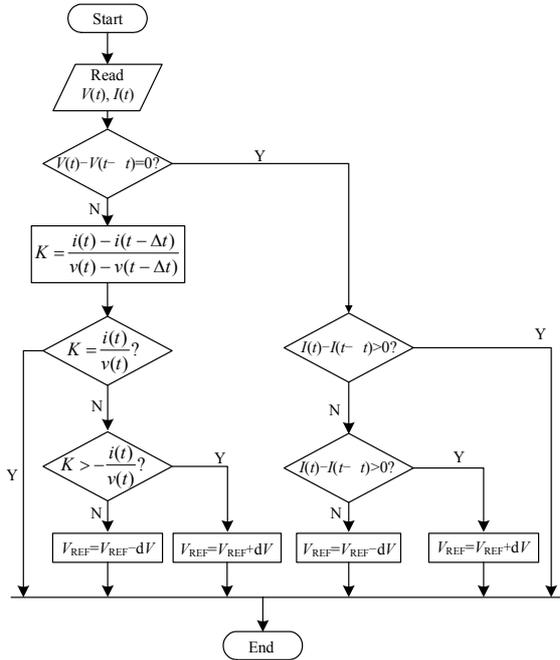


图 5 电导增量法逻辑框图

Fig. 5 Logical block diagram of the incremental conductance method

由图 3 所示的光伏输出特性可以看出，在一定外界环境下光伏电池阵列的输出功率，即曲线上某点与坐标轴包围的矩形面积是随光伏阵列的输出电压而呈显著非线性变化的。在某个电压上其输出功率有唯一的最大值，称该电压为最大功率点(MPP)电压。MPPT 控制的目标就是使控制光伏阵列的输出电压跟踪 MPP 电压，使光伏阵列有最大的光电转换效率。

将式(7)中的一阶动态环节用 PI 环节代替可得到图 4 中的内环电流控制，其控制框图如图 6。

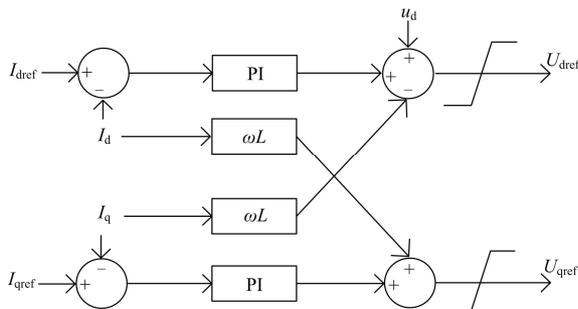


图 6 内环电流控制逻辑图

Fig. 6 Inner current control logic diagram

在 MPPT 控制下，光伏阵列发出当前环境下的最大功率；在外环功率控制下，光伏逆变器得到注入电网的电流参考值 i_{dref} 和 i_{qref} ；在内环电流控制下，逆变器注入电网的电流跟随其参考值变化。因此，光伏发电单元实现了最大的光电转换效率，并且将光伏阵列发出的功率全部送往电网，而不发送无功。

2.3 仿真结果

在 PSCAD 上搭建图 3 所示的光伏发电单元，其中光伏阵列参数如表 1 所示。

表 1 光伏阵列参数

Table 1 PV array parameters

参数名称	参数值
开路电压	44.5 V
最大功率点电压	35.5 V
短路电流	8.20 A
最大功率点电流	7.51 A
串联组件个数	17
并联组件个数	109

在标准测试环境下，光伏发电单元的稳态仿真结果如图 7 所示。光伏电池阵列的输出电压电流值和理论最大功率点的电压电流值(35.5 V×17=603 V, 7.51 A×109=818.6 A)基本相等。在该工作点光伏阵列输出最大的功率 0.5 MW。光伏并网点电压电流如图 8 所示。

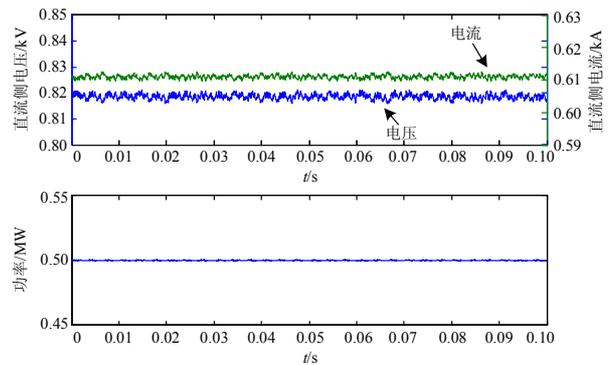


图 7 标准环境下光伏阵列输出

Fig. 7 Photovoltaic array output in standard environment

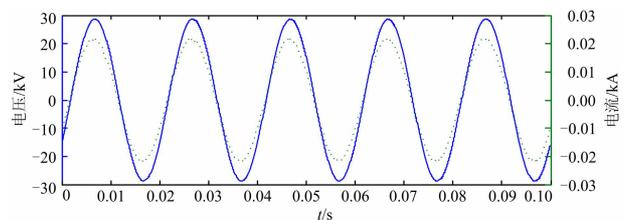


图 8 光伏并网点电压电流

Fig. 8 Voltage and current of point of common coupling

图 9(a)为温度保持 25 °C 不变时, 光伏发电单元输出功率随光照强度变化的曲线; 图 9(b)为光照强度保持 1 000 W/m² 不变时, 光伏发电单元输出功率随温度变化的曲线。可以看出, 光伏发电单元输出功率随光照强度增大而增大, 随温度升高而减小。

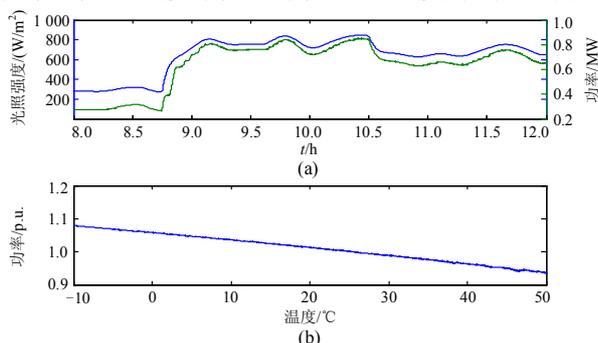


图 9 光照和温度变化时光伏单元的输出功率

Fig. 9 Output power of the photovoltaic unit when light and temperature changes

设故障前后光照强度维持在 800 W/m², 光伏发电单元并网发生经过渡电阻的三相对称故障时, 光伏发电单元的输出如图 10 所示, 故障期间光伏并网电压跌落到 0.3 p.u., 而光伏发电单元输出电流由于逆变器的钳制仅略微增大(达到 1.1 p.u.), 因此光伏发电单元输出有功相应地减少。由于采用功率解耦和单位功率因数控制, 光伏发电单元输出的无功仅在故障起始和消失时刻有些波动, 其余时刻均维持在零附近。

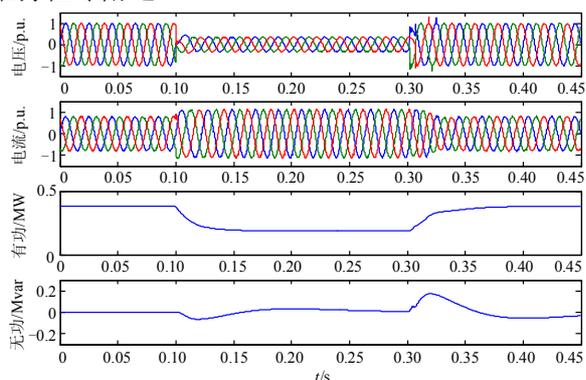


图 10 并网点对称故障光伏发电单元输出

Fig. 10 Output of photovoltaic generation unit when symmetrical fault on PCC

设故障前后光照强度维持在 800 W/m², 光伏发电单元并网发生金属性单相接地故障时, 光伏发电单元的输出如图 11 所示。故障期间光伏发电单元输出的电流、有功和无功与图 10 所示的对称故障的类似。由于输出电流基本为正序分量(负序分量约为正序的 0.1 倍, 不含零序分量), 而输出电压含有负

序分量, 所以输出的有功和无功都叠加了一个二倍工频的交流量。

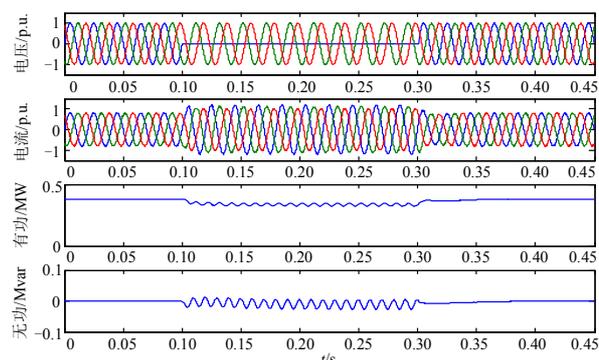


图 11 并网点单相接地故障光伏发电单元输出

Fig. 11 Output of photovoltaic generation unit when single-phase ground fault on PCC

仿真结果图 7、图 8 表明了光伏发电单元在标准环境下的运行状态均达到控制目标; 图 9 表明了光伏发电单元在环境变化时可以稳定运行, 并且其结果与工程实际中一致; 图 10、图 11 的暂态仿真结果与文献[11]中的现场实验数据基本吻合。以上仿真结果在一定程度上验证了光伏发电单元模型的有效性。

3 光伏电站接入电网电磁暂态等值建模

3.1 等值条件与方案

上文已经搭建了光伏发电单元的详细模型, 但是, 若以每个发电单元的详细模型来组成图 12 所示结构的光伏电站整体模型, 将使该模型十分庞大且占用大量计算资源。

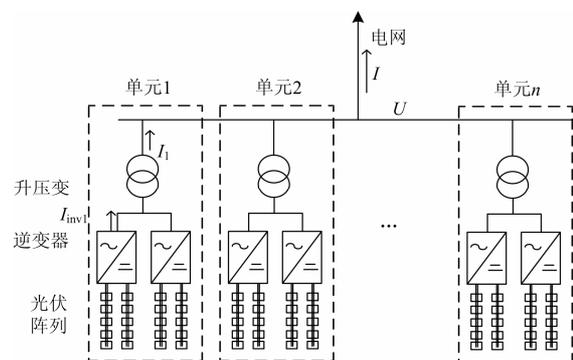


图 12 光伏电站结构

Fig. 12 PV power plant structure

在特定的条件下可以利用戴维宁等值方法将一个光伏电站等值为一个等值发电单元, 则该等值发电单元模型就可用于光伏电站接入电网的仿真计算^[12]。

光伏发电单元不同于传统同步电机，其故障期间没有一个不变的暂态内电势，也没有一个成熟的故障等效电路模型，所以无法利用电路简化的方法进行等值。

观察图 12，可以看出光伏电站内各个发电单元基本是相同的，故假定：

1) 各发电单元的所有参数分别相等；

2) 各个发电单元在同一时刻发送的功率一致（决定光伏电池功率的光照强度和温度在同一光伏电站内基本一致，故该假设符合工程实际）。

那么，不管外部电网状态如何，光伏电站内各个发电单元输出相同的电流。在这种简化下则可用图 13 所示的一个等值发电单元来替代图 12 所示的光伏电站，则等值发电单元应满足

$$\begin{cases} U_{\text{等值}} = U \\ I_{\text{等值}} = I = nI_1 = 2nI_{\text{inv1}} \end{cases} \quad (9)$$

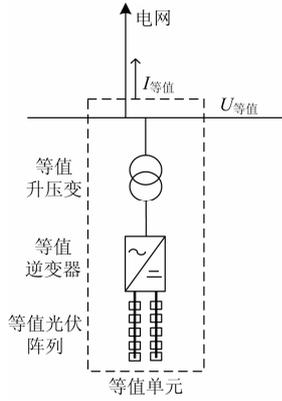


图 13 光伏电站等值结构

Fig. 13 Equivalent structure of photovoltaic power plants

3.2 等值方法

按照等式(9)的原则等值时，应先对光伏发电单元中单个逆变器的输出电流 I_{inv1} 进行分析。由图 4 和图 6 可以写出光伏发电单元中逆变器的控制方程为

$$\begin{cases} \frac{1}{C} \int (i_{\text{pv}} - i_{\text{dc}}) dt = U_{\text{DC}} \\ (U_{\text{DC}} - U_{\text{DCref}}) \left(k_1 + \frac{k_2}{S} \right) = i_{\text{dref}} \\ (i_{\text{dref}} - i_{\text{d}}) \left(k_3 + \frac{k_4}{S} \right) + E_{\text{d}} - \omega L i_{\text{q}} = U_{\text{dref}} \\ (i_{\text{qref}} - i_{\text{q}}) \left(k_3 + \frac{k_4}{S} \right) + \omega L i_{\text{d}} = U_{\text{qref}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： k_1 、 k_2 分别为外环功率 PI 控制的比例系数和积分系数； k_3 、 k_4 分别为内环电流 PI 控制的比例系

数和积分系数。式(10)中的 U_{dref} 、 U_{qref} 经坐标系变换后得到 a、b、c 三相的调制信号，调制信号与 U_{DC} 共同决定了逆变器的内电势。内电势、电网电压和并网电抗器的阻抗决定了逆变器的输出电流 i_{a} 、 i_{b} 、 i_{c} 并经坐标系变换得到 i_{d} 、 i_{q} 反馈到控制器。

令等值逆变器与光伏发电单元中的逆变器结构一致，参照式(10)可以写出等值逆变器的控制方程，式中上标“'”表示等值后参数。

$$\begin{cases} \frac{1}{C'} \int (i'_{\text{pv}} - i'_{\text{dc}}) dt = U'_{\text{DC}} \\ (U'_{\text{DC}} - U'_{\text{DCref}}) \left(k'_1 + \frac{k'_2}{S} \right) = i'_{\text{dref}} \\ (i'_{\text{dref}} - i'_{\text{d}}) \left(k'_3 + \frac{k'_4}{S} \right) + E'_{\text{d}} - \omega L i'_{\text{q}} = U'_{\text{dref}} \\ (i'_{\text{qref}} - i'_{\text{q}}) \left(k'_3 + \frac{k'_4}{S} \right) + \omega L i'_{\text{d}} = U'_{\text{qref}} \end{cases} \quad (11)$$

式(10)中各参数均认定为已知，而式(11)中各参数待求。将式(9)细化可以得到等值逆变器的控制目标为

$$\begin{cases} i'_{\text{pv}} = 2ni_{\text{pv}} \\ i'_{\text{dc}} = 2ni_{\text{dc}} \\ i'_{\text{d}} = 2ni_{\text{d}} \\ i'_{\text{q}} = ni_{\text{q}} \\ U'_{\text{DC}} = U_{\text{DC}} \\ U'_{\text{dref}} = U_{\text{dref}} \\ U'_{\text{qref}} = U_{\text{qref}} \end{cases} \quad (12)$$

联立求解式(10)~式(12)可以得到等值逆变器的参数为

$$\begin{cases} i'_{\text{pv}} = 2ni_{\text{pv}} \\ C' = 2nC \\ L' = \frac{1}{2n}L \\ k'_1 = 2nk_1 \\ k'_2 = 2nk_2 \\ k'_3 = \frac{1}{2n}k_3 \\ k'_4 = \frac{1}{2n}k_4 \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(11)中，可将等值逆变器控制方程化为式(14)。

由式(14)可以看出, 等值系统的结构改变参数后, 仅需将内环电流控制反馈的电流信号除以 $2n$ 后送入反馈端而不改变外环功率控制的结构和参数。这样就可以在单台逆变器模型的基础上十分简便地实现光伏电站的等值建模。

$$\begin{cases} \frac{1}{C'} \int (i_1' - i_2') dt = U_{DC}' \\ (U_{DC}' - U_{DCref}') \left(k_1 + \frac{k_2}{S} \right) = i_{dref}' \\ \left(i_{dref}' - \frac{i_d'}{2n} \right) \left(k_3 + \frac{k_4}{S} \right) + E_d' - \omega L \frac{i_q'}{n} = U_{dref}' \\ \left(\frac{i_{qref}'}{2n} - \frac{i_q'}{2n} \right) \left(k_3 + \frac{k_4}{S} \right) + \omega L \frac{i_d'}{n} = U_{qref}' \end{cases} \quad (14)$$

综合式(13)、式(14)可以得到光伏电站等值系统中等值光伏阵列和等值逆变器的等值方法。

1) 等值光伏阵列。等值光伏阵列中组件特性与发电单元的阵列组件特性一致, 等值光伏阵列组件串联个数与发电单元的光伏阵列组件串联个数相等, 等值光伏阵列组件并联个数等于光伏电站所有光伏阵列组件并联个数之和。

2) 等值逆变器。结构与发电单元中逆变器结构一致, 等值逆变器结构参数中所有阻抗为单个发电单元中逆变器对应阻抗的 $\frac{1}{2n}$ 倍。

3) 等值逆变器的控制器。等值控制器结构与发电单元中逆变器控制器的结构一致, 控制参数一致, 电流反馈信号先乘 $\frac{1}{2n}$ 后再反馈到控制器。

4) 等值升压变。等值升压变的容量为发电单元中升压变容量的 n 倍, 阻抗标么值参数不变。

3.3 等值系统仿真结果

在 PSCAD 上分别搭建一光伏电站的详细模型和等值模型, 通过比较它们的输出特性来验证上述分析。令 3 个由两台 0.5 MW 逆变器组成的 1 MW 发电单元构成详细模型, 并将其等值为一台 3 MW 的等值逆变器和一台 3 MW 的等值升压变。在详细模型和等值模型各自的并网节点处设置相同的三相对称故障, 其响应如图 14 所示。

由图 14 可以看出, 等值模型的故障输出电压电流波形和详细模型的基本完全重叠, 仿真结果验证了该等值方法的有效性。

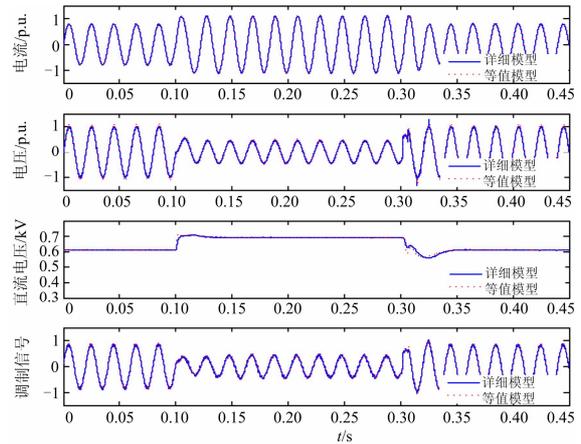


图 14 详细模型和等值模型的故障特性

Fig. 14 Failure characteristics of the detailed model and equivalent model

4 结论

本文分析了通过单级式光伏逆变器并网的光伏发电系统的结构及其控制, 得到了光伏发电单元电磁暂态仿真模型。本文提出的等值方法简单、易行, 仿真结果验证了该等值方法的有效性。本文的工作为光伏系统故障特性分析等进一步的研究建立了基础。

参考文献

[1] 杨德州, 王利平, 张军, 等. 大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析——光伏电站专题[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 104-110.
YANG Dezhou, WANG Liping, ZHANG Jun, et al. Modeling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 104-110.

[2] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
CHEN Quan, LI Lingdong, WANG Qunjing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.

[3] 李冬辉, 王鹤雄, 朱晓丹, 等. 光伏并网发电系统几个关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 208-214.
LI Donghui, WANG Hexiong, ZHU Xiaodan, et al. Research on several critical problems of photovoltaic grid-connected generation system[J]. Power System

- Protection and Control, 2010, 38(21): 208-214.
- [4] 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): 77-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. PSCAD/EMTDC-based three-phase photovoltaic grid power system simulation research[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 77-81.
- [5] TSAI Huanliang, TU Cixiang, SU Yijie, et al. Development of generalized photovoltaic model using Matlab/ Simulink[C] // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2008.
- [6] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓琪, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] KOMATSU Y. Application of the extension PQ theory to a mains-coupled photovoltaic system[C] // Proceedings of the IEEE Power Conversion Conference, Osaka, 2002, 2: 816-821.
- [8] 汪海宁, 苏建徽, 丁明, 等. 光伏并网功率调节系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 75-79.
WANG Haining, SU Jianhui, DING Ming, et al. Photovoltaic grid power conditioning system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 75-79.
- [9] HUSSEIN K H, MUTA I, HOSHINO T, et al. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(1): 59-64.
- [10] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
SUN Ziyong, YU Hang, YAN Gangui, et al. PSCAD simulation models for photovoltaic array and MPPT controller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 61-64.
- [11] 秦筱迪. 光伏系统 LVRT 能力检测技术及功率控制[R]. QIN Xiaodi. Detection technology of photovoltaic systems LVRT capacity and power control[R].
- [12] 王皓怀, 汤涌, 侯俊贤, 等. 风光储联合发电系统的组合建模与等值[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 1-9.
WANG Haohuai, TANG Yong, HOU Junxian, et al. Combination of cogeneration systems scenery storage modeling and equivalents[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 1-9.

收稿日期: 2014-03-27; 修回日期: 2014-04-25

作者简介:

闫凯(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源接入电力系统的保护与控制; E-mail: 820015030@qq.com

张保会(1953-), 男, 教授, 从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究;

瞿继平(1983-), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护的研究。