

# 独立运行光伏系统暂态电压稳定分析

盛 鸱<sup>1,2</sup>, 孔 力<sup>1</sup>, 苗 蕾<sup>3</sup>, 裴 伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2 中国科学院研究生院, 北京 100080;

3. 河南省邓州市电业局, 河南 邓州 474150)

**摘要:** 独立运行光伏电力系统中存在着电压稳定问题。根据系统的特点和问题的性质, 采用时域数值仿真的方法分析, 应用 Matlab 建立系统仿真模型, 并搭建了实验系统平台, 采用瞬时无功功率求解法快速检测无功功率。仿真和实验结果证明无功功率不平衡是导致该类系统不稳定的主要原因。最后, 提出了解决暂态电压稳定的有效办法和措施, 对独立光伏电站的正常运行有指导性意义。

**关键词:** 独立光伏系统; 暂态稳定; 时域数值仿真; 瞬时无功功率; 无功补偿

**中图分类号:** TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)23-0039-05

## 0 引言

独立的太阳能光伏发电系统, 作为解决边远无电地区供电的有效手段, 在我国西藏等地区, 得以大量实际的应用<sup>[1]</sup>。在这些独立运行系统的设计过程中, 因为结构相对比较简单, 因此只对系统容量与负荷估计等因素作了相关的讨论, 而没有对该类系统的稳定性问题, 尤其是暂态稳定问题考虑进行深入的研究。随着系统容量扩大, 变压器和输配电系统的加入 (如图 1 所示), 系统的暂态稳定性的问题就会表现出来。如在系统带载投入时, 会造成操作失败<sup>[2]</sup>。这些现象的出现, 影响了系统的正常运行, 制约了独立运行光伏发电系统的进一步普及应用。

针对以发电机为电源的系统, 未对有限直流源经逆变供电的电力系统的情况讨论。其次, 过去的独立系统中一般不包括输配电系统, 对变压器的讨论也较少。而这些是影响独立系统暂态稳定性的重要因素。最后, 因为该类系统主要的发展趋势是并网运行, 很少针对独立运行的系统进行稳定性分析<sup>[4~6]</sup>。

本文对位于西藏安多的独立光伏供电系统进行仿真建模, 并搭建了简单的以逆变器为核心的实验系统。由于在实际运行系统中, 暂态过程中的电气量非正弦。因此, 需要利用瞬时无功功率快速求解无功功率。因此, 本文在仿真模型和实验平台中, 采用了瞬时无功功率求解法来分析系统无功功率对暂态电压稳定的影响。

## 1 独立光伏发电系统的暂态电压稳定问题

无功功率除了消耗设备容量, 增加设备和线路损耗外, 还会加大线路和变压器的电压降, 降低系统的电压稳定性。而当系统中存在冲击性无功功率负载时, 还会使电压产生剧烈波动, 使电能质量严重下降<sup>[7]</sup>。以图 2 所示简单的电力系统和负荷的等效电路为例分析。可得:

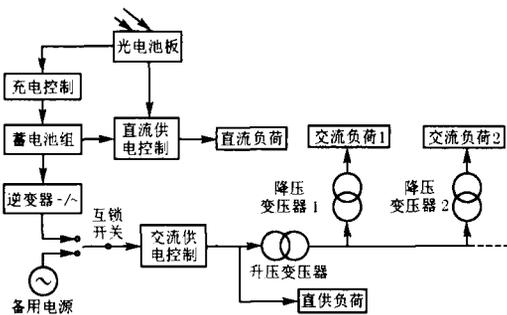


图 1 独立光伏发电系统示意图

Fig 1 Sketch map of a stand-alone photovoltaic power generation system

国内外应用传统的电力系统暂态稳定性分析方法, 针对独立电力系统的稳定性问题的特点, 还是做了很多的研究工作, 得到了很多值得借鉴的成果, 但还有许多不足<sup>[3]</sup>。首先, 前面的研究工作, 主要是

一般情况下,  $E$  和  $U$  间夹角很小。在图 1 所代表的独立运行系统中, 输电电压等级为 10 kV, 因此,  $R_s$  比  $X_s$  小得多。因此式 (1) 可简化为:

$$U = \frac{P - jQ}{U} (R_s + jX_s) = \frac{PR_s + QX_s}{U} + j \frac{PX_s - QR_s}{U} = U_R + j U_x \quad (1)$$

$$|U| \frac{QX_s}{U} \quad (2)$$

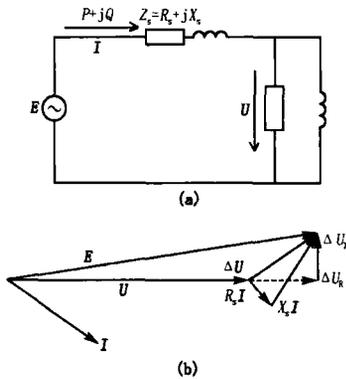


图 2 系统等效电路及相量图

Fig 2 Equivalent circuit of power system with load and vector map

从式 (2) 看出, 系统电压的波动主要是由无功功率的波动引起的。

传统的功率定义, 是建立在平均值基础上的定义, 并且在现场检测应用中, 需要积分一个周期才能得到检测结果, 在暂态的时域分析过程中, 有一定的局限性。而在 80 年代由赤木泰文提出并逐步发展起来的三相电路的瞬时无功功率理论, 可以完全无延时地得到检测结果, 具有很好的实时性。不仅适用于正弦波, 而且适用于非正弦波和任何的过渡过程的情况<sup>[8-12]</sup>。

设三相电路的各相电压和电流的瞬时值分别为  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  和  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ , 转换到  $\alpha$ - $\beta$  两相正交坐标系下, 得到  $e_\alpha$ 、 $e_\beta$  两相的瞬时电压  $e_\alpha$ 、 $e_\beta$  和两相瞬时电流  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 。则各相的瞬时无功功率为:

$$\begin{cases} q_a = e_a i_{\alpha q} = e_a (e_b - e_c) \frac{q}{A} \\ q_b = e_b i_{\beta q} = e_b (e_c - e_a) \frac{q}{A} \\ q_c = e_c i_{\gamma q} = e_c (e_a - e_b) \frac{q}{A} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(e_b - e_c) i_a + (e_c - e_a) i_b + (e_a - e_b) i_c]$$

$$A = (e_a - e_b)^2 + (e_b - e_c)^2 + (e_c - e_a)^2$$

上式代入式 (2), 得:

$$\begin{cases} e_a = \frac{Q_a X_s}{e_a} = \frac{q X_s (e_b - e_c)}{A} \\ e_b = \frac{Q_b X_s}{e_b} = \frac{q X_s (e_c - e_a)}{A} \\ e_c = \frac{Q_c X_s}{e_c} = \frac{q X_s (e_a - e_b)}{A} \end{cases} \quad (4)$$

## 2 系统仿真及其分析

### 2.1 系统仿真结构

本文选择较有代表性的安多光伏电站为研究对象。安多光伏电站设计总容量 100 kW。系统的负荷是以各种照明设备为主的负荷。由于输电距离相对较长, 为减少传输损耗, 采用 10 kV 输电、380 V 配电的方案。系统模型如图 3。

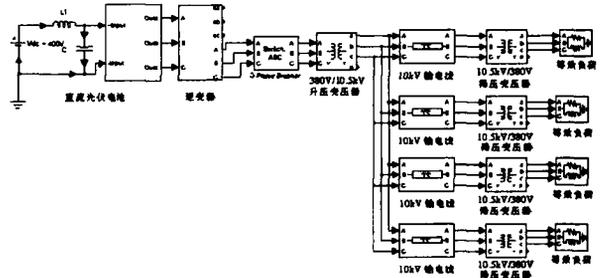


图 3 独立运行光伏发电系统仿真模型

Fig 3 Simulation model of stand-alone photovoltage generation system

为了分析系统的瞬时无功功率的流动, 根据前面介绍的瞬时无功功率的定义, 应用 Simulink 提供的库函数, 搭建了计算系统中各部分的三相瞬时无功功率的计算模块, 得到任一节点的三相瞬时无功功率。

### 2.2 仿真结果

#### 2.2.1 系统投入对系统暂态稳定性影响

使用前面图 3 的仿真模型仿真计算系统的运行状况。  $t=0$  15 s, 逆变器输出额定电压, 系统通过开关将输电系统和负载共同投入到逆变器输出端。系统逆变器侧瞬时无功功率和电压分别如图 4、5 所示。

仿真表明: 系统中的瞬时无功功率随着负荷冲击性无功负荷的减小以及输电系统的过渡过程的结束而逐步减少; 无功功率的传输导致系统负荷端的电压降落。随着过渡过程结束, 负荷端的电压逐步恢复到稳定运行状态下的额定。

#### 2.2.2 负载特性对系统暂态稳定性影响

图 6 给出了不同的负载比率和功率因数的条件下, 系统负荷端电压最大降落 (电压峰值的瞬时值) 的关系图。可以看到, 负载投入时负载的比率越大, 系统的电压降落越严重。而投入负载的功率因数越低, 即系统中无功功率比率越大, 电压降落也越严重。因此, 为了改善系统的稳定性, 提高系统的运行性能, 必须在负载投入时, 控制负载的投入比率和功率因数。

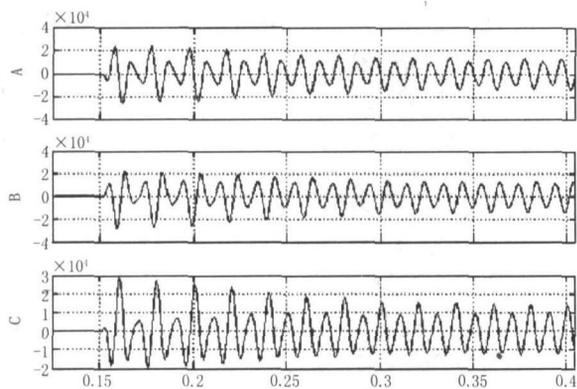


图 4 系统投入过程逆变器端三相瞬时无功功率  
 (纵坐标表示经过计算处理得到的瞬时无功功率,横坐标表示时间轴)

图 4 系统投入过程逆变器端三相瞬时无功功率

Fig 4 Instantaneous reactive power in A, B, C

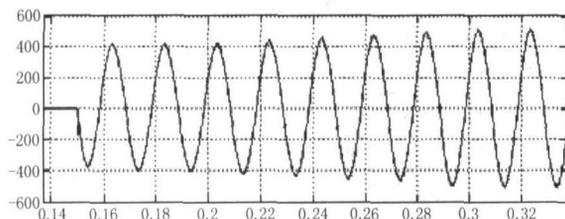


图 5 系统投入过程中负荷端电压波形

Fig 5 Instantaneous reactive power in A, B, C

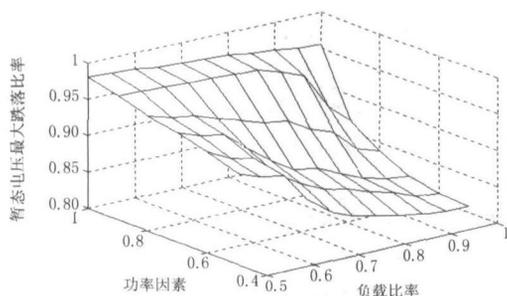


图 6 最大暂态电压与功率因数、负荷比率的关系

Fig 6 Relation between maximal transient voltage and PF of load and load ratio

### 3 小系统实验验证及其分析

#### 3.1 实验系统介绍

本文按图 7 所示的接线方法,搭建一个模仿独立运行光伏发电系统的一个简单的由蓄电池、逆变器和负荷构成的小系统<sup>[13]</sup>。

#### 3.2 实验结果

1)测量不同功率因数,不同容量的负载条件下,逆变器稳定输出的电压值,见表 1,其中表 1(a)、1(b)分别给出负载是纯阻性、阻感性负载的情

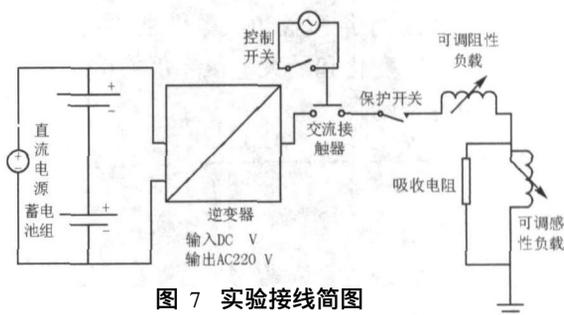


图 7 实验接线简图

Fig 7 Experimental diagrammatic sketch

况。逆变器空载稳定输出电压  $U_{off} = 231.5\text{V}$ 。

表 1(a) 纯阻性不同比率负荷下逆变器输出电压稳态值

Tab 1(a) Inverter output with fractional resistive load

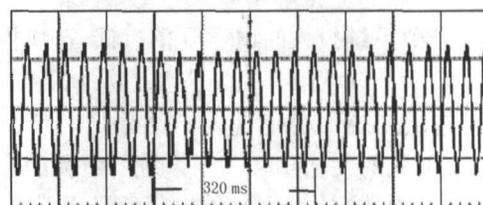
负荷占额定容量 / (%)	70.6	77.1	80.9	91.5
稳定输出电压 / V	225.7	225.6	224.5	224.2

表 1(b) 阻感性不同比率负荷下逆变器输出电压稳态值

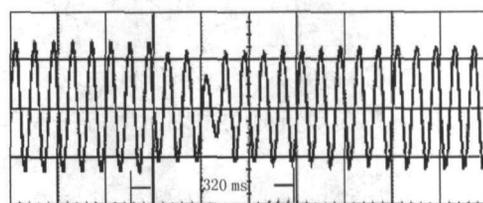
Tab 1(b) Inverter output with fractional inductive load

负荷占额定容量 / (%)	59.4	71.2	76.1	83.3	86.7	93.9
负荷功率因数	0.92	0.90	0.87	0.82	0.80	0.75
输出电压 / V	224.6	222.4	222.3	222.3	221.0	220.2

2)不同功率因数不同容量负载条件下,逆变器输出端输出电压的暂态波形如图 8。



(a) 60% 负载功率因数 0.9



(b) 90% 负载功率因数 0.75

(横坐标每格 100 ms, 纵坐标每格 50 V)

图 8 逆变器投入暂态电压波形图

Fig 8 Transient wave of voltage with inverter throw-in

#### 3.3 结果分析

1)在负载投入过程中,逆变器输出存在暂态过程。在逆变的带载能力较强的情况下,负载的变化对逆变器的稳态输出影响很小。

2)随着负荷比率的提高,逆变器在负载投入时电压降落越严重。负载功率因数越低,电压的畸变也越严重,电压降落也更严重。

3) 图 9 给出了纯阻性负载条件下,实验和仿真得到的负载比率变化和最大电压降落关系。实验与仿真结果较好地吻合。

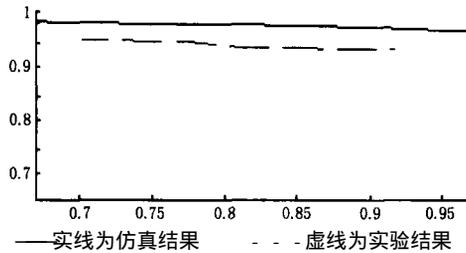


图 9 功率因数 1 不同比率负载下暂态最大电压降落比较

Fig 9 Transient voltage value in PF 1 with fractional load

#### 4 结论

本文针对独立运行系统结构的特点和存在问题的性质,判定系统中存在的问题为暂态稳定性问题。结合瞬时无功功率求解无功功率,分析讨论其对系统稳定性的影响。经过对仿真和实验结果的分析,得到以下结论:

1) 该类独立运行光伏发电系统在投入负载运行时存在明显的电压降落现象,如果不采取相应的措施,会导致系统投入时电压降落过低,造成投入失败。

2) 造成系统不稳定现象的原因是由负荷以及输电系统引入的无功功率。而系统的负荷的容量和负荷的功率因数,是影响这种电压降落程度的主要因素。

3) 针对独立运行光伏发电系统,可以通过合理分布负荷、负荷通过延时装置分步投入以及添加无功功率补偿设备提高负荷功率因数等方法改善系统的稳定性。

4) 在负荷的容量和功率因数满足条件的情况下,投入运行时电压降落在允许范围内。在安多系统,为了避免在最大电压降落为 90% 时欠压保护动作,在投入 80% 负载条件下,负载的功率因数要大于 0.8。

#### 参考文献:

- [1] 我国太阳能资源约等于上万个三峡工程发电量 [J]. 中国人口、资源与环境, 2006, 16(1): 65-65.  
Solar Energy of China Equal to Ten Thousands of Sanxia Project's Electrical Power [J]. Population, Resource & Environment of China, 2006, 16(1): 65-65.
- [2] 安多光伏电站验收报告 [R]. 中国科学院电工研究所.

Acceptance Report of Anduo PC Station [R]. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science

- [3] 杨秀霞, 张晓锋, 等. 独立电力系统故障恢复现状及发展趋势 [J]. 继电器, 2004, 32(19): 74-79.  
YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, et al Present Situation and Developing Trend of Isolated Power System Restoration [J]. Relay, 2004, 32(19): 74-79.
- [4] 刘树, 赵争鸣, 等. 基于改进 MPPT 算法的单级式光伏并网系统 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2005, 45(7): 873-876.  
L U Shu, ZHAO Zheng-ming, et al One-level Photovoltaic Grid-connected System Based on an Improved MPPT Algorithm [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2005, 45(7): 873-876.
- [5] Vachtsevanos G J, Kang H. Simulation Studies of Islanded Behavior of Grid-connected Photovoltaic Systems [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1989, 4(2): 177-183.
- [6] Asiminoaei L, Teodorescu R, Blaabjerg F. A Digital Controlled PV-inverter with Grid Impedance Estimation for ENS Detection [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(6): 1480-1490.
- [7] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
YU Yi-xin, WANG Cheng-shan. Power System Stability Theory and Method [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [8] Varaiya P P, Wu F F, Chen R L. Direct Methods for Transient Stability Analysis of Power System Recent Results [J]. Proceedings of IEEE, 1985, 73(2).
- [9] 王兆安, 等. 三相电路瞬时无功功率理论研究 [J]. 电工技术学报, 1992, 8(3): 55-59.  
WANG Zhao-an, et al A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power of Three Phase Circuits [J]. Trans of China Electrotechnical Society, 1992, 8(3): 55-59.
- [10] 刘进军, 等. 基于旋转空间矢量分析瞬时无功功率理论及其应用 [J]. 电工技术学报, 1999, (1): 49-55.  
L U Jin-jun, et al Analysis of Theory and Applications of Instantaneous Reactive Power Based on Space Vector Method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, (1): 49-55.
- [11] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
WANG Zhao-an, YANG Jun, L U Jin-jun Harmonic Component and Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [12] 熊元新, 陈允平. 三相电路瞬时无功功率分析与计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(1): 15-17, 40.

X DNG Yuan-xin, CHEN Yun-ping Analysis and Calculation on the Instantaneous Reactive Power of Three-phase Circuit[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2001, 13 (1): 15-17, 40

[13] 刘和平. TMS320LF240x DSP结构、原理及应用 [M]. 北京航空航天大学出版社, 2002

LU He-ping Structure, Principle and Application of TMS320LF240x DSP [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002

收稿日期: 2006-07-25; 修回日期: 2006-09-17

作者简介:

盛 鹏 (1978 - ),男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统; E-mail: shengkun@mail.iee.ac.cn

孔 力 (1955 - ),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为电力电子、分布式发电;

裴 玮 (1982 - )男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统。

### Transient stability analysis for stand-alone photovoltaic system

SHENG Kun<sup>1,2</sup>, KONG Li<sup>1</sup>, MAO Lei<sup>3</sup>, PEI Wei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. Dengzhou Power supply Bureau, Dengzhou 474150, China)

**Abstract:** Voltage instability of a stand-alone photovoltaic power system is studied. According to system's characters and the instability problem in PV system, a simulation model is built by using numerical simulation method in time-domain and instantaneous reactive power theory, and an experimental system is established. The results of simulation and experiment show that the imbalance of reactive power in the system is the main reason of instability. A solution based on instantaneous reactive power theory is presented, which has guiding significance to make PV system run normally.

**Key words:** stand-alone photovoltaic power system; transient stability; numerical simulation method in time-domain; instantaneous reactive power; reactive power compensation

(上接第 34 页 continued from page 34)

作者简介:

李妍红 (1982 - ),女,硕士研究生,研究方向为电力系统暂态稳定分析与最优潮流计算; E-mail: yaoyao\_lyh@163.com

陈 荃 (1981 - ),女,硕士研究生,研究方向为电力系统

中长期电压稳定分析;

刘明波 (1964 - ),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统优化、运行与控制。

### Studies on compensatory degree and grouping of low voltage dynamic reactive-power compensator in distribution networks

LI Yan-hong, CHEN Quan, LU Ming-bo

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper investigates how to configure the capacity of low voltage dynamic reactive-power compensators and group the capacitors in distribution networks by using practical data from an experimental project in a Guangdong power grid company. Four distribution networks, which all rate at 10kV, are taken as detailed examples and the root mean square value of transient power factor is used as a criterion to evaluate efficiency of compensation. The paper aims to provide a reasonable and feasible criterion for the practical operation of configuring low voltage dynamic reactive-power compensators. At the same time, a feasible control strategy is also introduced, by which the root mean square value of transient power factor can be hold within its expected profile.

**Key words:** distribution network; low voltage dynamic reactive-power compensation; compensatory degree; capacitor grouping

(上接第 38 页 continued from page 38)

ta-heuristic. Combined with distribution networks, this paper uses Ant Colony System approach to solve distribution reconfiguration problem, builds responding math model and give algorithm. To demonstrate the validity and effectiveness of the proposed method, an example system is studied. The results are also given, which reveal that the proposed method is feasible and effective.

**Key words:** distribution network; reconfiguration; loss reduction; ant colony system