

# 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究

龙源, 李国杰, 程林, 孙元章

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市海淀区 100084)

## A Study on Damping Power System Oscillations Based on Photovoltaic System

LONG Yuan, LI Guo-jie, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** Power system security and stability are seriously affected by power oscillations. According to the feature of photovoltaic (PV) system that the active and reactive power being injected into power network by PV system can be controlled independently, the authors propose a method to restrain power oscillation in power network by use of PV system. Firstly, the principle of restraining power oscillation in single machine infinite bus system by PV system is theoretically analyzed; then by means of simulation software PSCAD the simulation of single machine infinite bus system containing PV system is conducted. Theoretical analysis shows that by means of additional control of active and reactive power PV system connected with power network can increase system damping. The effectiveness of restraining power oscillation occurred in single machine infinite bus system is verified by simulation results, thus the conclusion that large capacity PV system connected with power network can be used as an effective device to restrain power oscillation is obtained.

**KEY WORDS:** photovoltaic system; power oscillations; system damping; power system stability

**摘要:** 由于功率振荡严重威胁电网的安全稳定运行, 基于光伏发电系统能独立控制其注入电网有功、无功的特点, 提出了利用光伏发电系统来抑制电网功率振荡的方法, 首先在理论上分析了单机无穷大系统中基于光伏电池的功率振荡抑制的原理, 然后对单机无穷大系统带光伏发电系统运行进行了仿真分析。理论分析表明通过有功和无功的附加控制, 光伏并网系统能够增加系统的阻尼。仿真结果进一步验证了其在单机无穷大系统中抑制振荡的有效性。得出大容量并网光伏发电系统可作为抑制系统振荡有效装置的结论。

**关键词:** 光伏发电系统; 功率振荡; 系统阻尼; 电力系统稳定

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50277020)。

Project Supported by Natural Science Foundation of China (50277020).

## 0 引言

电力系统中发电机经输电线并列运行时, 在扰动下会发生发电机转子间的相对摇摆, 并在缺乏系统阻尼时引起持续振荡, 此时输电线上的功率也会发生相应振荡, 通常频率较低, 也称低频振荡。长时间的低频振荡会引起继电保护误动作, 增幅的低频振荡将造成振荡失步, 对系统危害严重。功率振荡问题通常由系统阻尼不足所引起, 系统阻尼与网络结构、传输容量、励磁调节有关, 在长距离、重负荷输电线上、采用现代快速高顶值倍数励磁系统时容易出现阻尼不足甚至负阻尼现象<sup>[1-3]</sup>。通常采用特征分析法分析低频振荡问题<sup>[4]</sup>。抑制振荡的措施是用附加装置向系统提供正阻尼, 应用最广泛的是利用电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)控制发电机励磁以提高系统的阻尼, 取得了比较好的效果<sup>[5-6]</sup>。此外, 随着电力电子技术的迅速发展, 利用灵活交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)装置的附加阻尼控制来抑制振荡也取得了一定的效果<sup>[7-11]</sup>, 如可控串补(thyristor controlled series compensation, TCSC)、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等。这些方法都是通过控制无功、电压来抑制振荡。事实上, 功率振荡是有功的不平衡引起的, 有功调节比无功调节对抑制振荡更直接、更有效。利用高压直流输电附加控制提供低频振荡的附加阻尼就是通过同时控制有功和无功来抑制振荡的<sup>[12]</sup>。FACTS与储能系统相结合的装置由于提供了有功储能, 可实现有功、无功独立调节, 控制上比FACTS更灵活, 因而抑制振荡的效果比FACTS只控制无功要

好,但其发展受储能容量的限制。常用的储能装置有超导储能<sup>[13]</sup>和蓄电池储能。

目前,作为清洁能源的太阳能发电已越来越受到重视并得到应用,大容量并网是光伏发电发展的方向,特点是其能发出的最大功率随太阳辐射和环境温度而变化,注入电网的有功功率在最大功率与零之间可控,目前光伏发电并网运行是通过最大功率追踪技术使其运行在最大功率点<sup>[14]</sup>,本文不使光伏电池工作在最大功率点,而是工作在最大功率与零之间的某一点上。这样就可调节注入电网的有功参与抑制振荡。此外,由于光伏电站并网装置含有一个三相逆变器,可通过控制逆变器双向调节向系统发送的无功。光伏并网系统的能量来自于太阳能,当阳光充足时有功容量可通过增加电池板数目来提高,完全不受限制。相比其他电源,光伏发电利用的是清洁的、可再生太阳能,可提供快速的有功功率和无功功率调节,且其容量在技术上没有限制。据此,本文提出基于光伏电池的电网功率振荡抑制的思想,通过调节并网光伏发电系统输出的有功功率和无功功率抑制电网功率的振荡。用理论分析证明了通过有功和无功的附加控制可增加系统的阻尼,并在单机无穷大系统中进行仿真实验,验证其抑制振荡的有效性。

## 1 光伏电池发电的特性及仿真模型

光伏电池是由半导体材料制成的能将太阳辐射能量转化为电能的光电转换器件,其伏安特性如图1所示,伏瓦特性如图2所示。图中: $S$ 为光辐射强

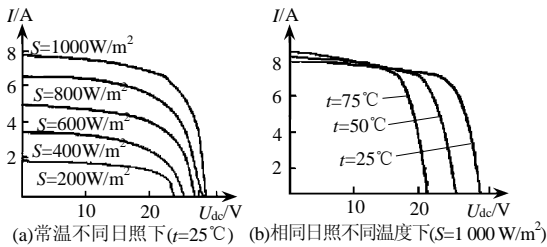


图1 光伏电池伏安特性

Fig. 1 The voltage-ampere characteristics of photovoltaic cell

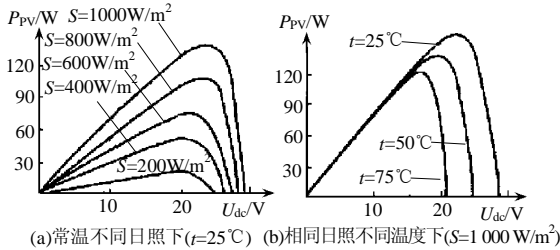


图2 光伏电池伏瓦特性

Fig. 2 The voltage-watt characteristics of photovoltaic cell

度, $t$ 为电池板温度, $I$ 为光伏电池输出电流, $U_{dc}$ 为光伏电池端电压, $P_{PV}$ 为光伏电池发出的功率。

如图1所示,光伏电池的工作区可分为电流源区和电压源区。由图2可知,光伏电池最大功率点随光辐射强度和电池板温度改变而改变。在一定的天气条件下可通过控制其端电压 $U_{dc}$ 来决定其运行点使得输出功率 $P_{PV}$ 在零与最大功率间变化。实际运行中常将光伏电池单体并联、串联组成光伏阵列来满足容量和电压的要求。

光伏电池生产厂家可提供标准状态下(辐射强度 $S_{ref}=1\ 000\ W/m^2$ 、温度 $T_{ref}=298\ K$ )的光伏电池单体外特性参数如下:电流温度系数 $a, A/^{\circ}C$ ;电压温度系数 $b, V/^{\circ}C$ ;最大功率电压 $U_m, V$ ;最大功率电流 $I_m, A$ ;开路电压 $U_{oc}, V$ ;短路电流 $I_{sc}, A$ ;  $S$ 为实际光辐射强度; $T$ 为实际电池板绝对温度。光伏电池工程用数学模型<sup>[15]</sup>表示如下

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) \exp[-U_m / (C_2 U_{oc})] \quad (1)$$

$$C_2 = (U_m / U_{oc} - 1) [\ln(1 - I_m / I_{sc})]^{-1}$$

$$\Delta I = a \frac{S}{S_{ref}} (T - T_{ref}) + \left( \frac{S}{S_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (2)$$

$$\Delta U_{dc} = b(T - T_{ref})$$

$$I = I_{sc} [1 - C_1 (\exp(\frac{U_{dc} - \Delta U_{dc}}{C_2 U_{oc}}) - 1)] + \Delta I \quad (3)$$

利用厂家提供的光伏电池外特性,可在PSCAD仿真系统中建立光伏电池板的模型<sup>[16]</sup>。

## 2 光伏电池并网发电的原理

光伏电池将太阳能直接转换成电能,输出直流电压,通过光伏逆变器将直流电逆变成交流电输送给电网,光伏逆变器由电压源型的可快速关断器件组成。电路原理如图3所示<sup>[17]</sup>,主要包括光伏电池板、直流侧电容、电压源型逆变器、交流侧电感及并网变压器。其中 $e_{abc}$ 代表电网三相电压; $i_{abc}$ 代表电网与逆变器间的三相电流; $U_{dc}$ 为逆变器直流侧电压也是光伏电池端电压; $P$ 、 $Q$ 分别为光伏发电系统注入电网的有功和无功功率; $U_{dc}^*$ 为给定光伏电池端电压; $Q^*$ 为给定注入电网的无功功率; $i_{abc}^*$ 为网侧电流指令, $m$ 为其幅值, $\theta$ 为其相位; $\omega t_{abc}$ 为网侧同步信号; $u_{rabc}$ 为三相脉宽调制波指令。并网逆变器采用直接电流控制<sup>[18]</sup>,如式(4)所示

$$u_{tk} = [K_F e_k - K_p (i_k^* - i_k)] / U_{dc}, \quad (k = a, b, c) \quad (4)$$

式中 $K_F$ 、 $K_p$ 为比例控制系数。

光伏发电并网装置的结构与STATCOM基本相

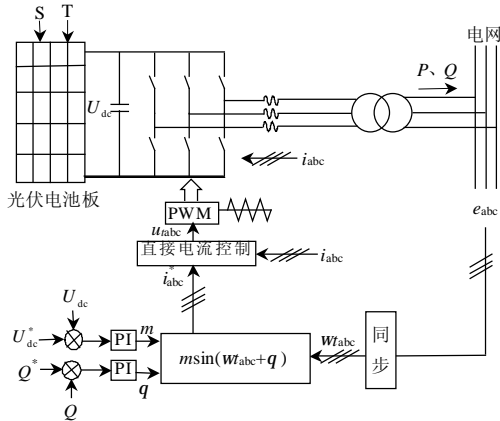


图3 光伏电池并网发电原理

Fig. 3 The schematic of a grid-connected photovoltaic system

同，可以发送和吸收无功功率，不同的是光伏电池还发送有功功率。有功控制通过直流侧电压  $U_{dc}$  闭环控制来实现，直流侧功率  $P_{PV}$ =交流侧有功功率  $P$ +逆变器损耗  $P_{loss}$ 。无功功率控制与有功功率控制相互独立，根据这一特点本文展开基于光伏电池的电网功率振荡抑制的研究。

### 3 无功极限分析

首先，在发送一定有功的情况下，发送无功受所设计的逆变器开关管容量的限制。其次，在逆变器容量足够大的情况下，还受传输线路的限制，等值电路如图4所示。图中， $U_1$ 为逆变器交流侧电压大小； $U_m$ 为接入点电压大小； $\alpha$ 为逆变器交流侧电压与接入点电压的相角差； $x$ 为逆变器交流侧电感。

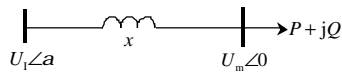


图4 并网等值电路

Fig. 4 Equivalence circuit of the grid-connected photovoltaic system

功率方程

$$P = \frac{U_m U_1}{x} \sin \alpha, \quad Q = \frac{U_m U_1}{x} \cos \alpha - \frac{U_m^2}{x} \quad (5)$$

因此有 
$$P^2 + \left(Q + \frac{U_m^2}{x}\right)^2 = \left(\frac{U_m U_1}{x}\right)^2 \quad (6)$$

实际上，由于光伏电池板不能吸收有功，当光伏电池因为无光照而不发电时，通过直流侧电压闭环控制，逆变器从电网吸收有功电流来维持直流侧电压的恒定，这部分有功只是逆变器开关管的损耗，非常小。光伏电池发送的最大有功功率与太阳光辐射量和所设计的光伏电池容量有关，在  $0 \sim P_{max}$  间变化。实际工作区域如图5中阴影所示。在  $P=0$  时有

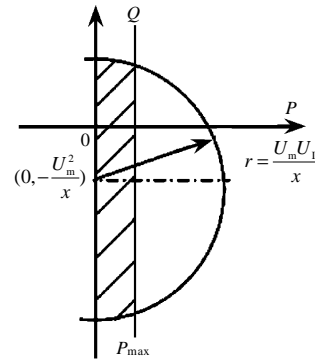


图5 有功无功极限

Fig. 5 The diagram of P-Q limitation

$$-\frac{U_m U_1}{x} - \frac{U_m^2}{x} \leq Q \leq \frac{U_m U_1}{x} - \frac{U_m^2}{x} \quad (7)$$

## 4 单机无穷大系统分析

### 4.1 系统模型

本节讨论单机无穷大系统中抑制功率振荡的问题，光纤电站并联接入单机无穷大系统(如图6所示)。其中， $E'_q$ 为发电机的暂态电抗  $x'_d$ 后电动势的 q 轴分量； $U_m$ 为基于光伏电池的功率振荡抑制器注入点 A 的母线电压； $x_1$ 为计及  $x'_d$ 从发电机到注入点 A 的总电抗； $x_2$ 为点 A 到无穷大母线的电抗； $E'_q$ 和  $U_s$ 之间的相角差为  $\delta$ ； $U_m$ 和无穷大系统电压  $U_s$ 之间的相角差为  $\delta - \theta$ 。假设  $P_e$ 为发电机发出功率； $H$ 为发电机惯性常数； $D$ 为阻尼系数； $\omega_0$ 为同步角速度； $d_0$ 、 $q_0$ 、 $U_{m0}$ 分别为  $d$ 、 $q$ 、 $U_m$ 的初始值。

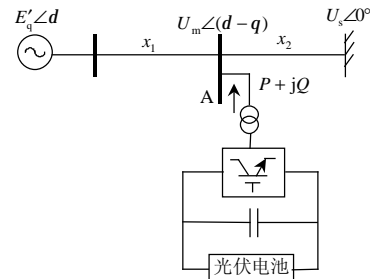


图6 光伏电站并联接入单机无穷大系统

Fig. 6 A single-machine infinite bus system with photovoltaic generator

功角方程

$$P_e = E'_q U_m \sin \theta / x_1 \quad (8)$$

如不考虑发电机励磁系统和调速器的影响，则发电机经典二阶模型的小扰动运动方程可写成如下形式

$$Hs^2 \Delta \delta + Ds \Delta \delta + \omega_0 \Delta P_e = 0 \quad (9)$$

根据功率平衡关系得到

$$\frac{E'_q U_m}{x_1} \sin \theta + P = \frac{U_m U_s}{x_2} \sin(\delta - \theta) \quad (10)$$

#### 4.2 光伏发电系统控制方式 1

在恒定有功功率和无功纯电压控制下,有功、无功均无附加阻尼控制,即  $P$ 、 $U_m$  恒定,控制框图如图 7 所示。



图 7 无附加控制  
Fig. 7 Without additional control

无附加控制时有

$$\Delta P = 0, \Delta U_m = 0 \quad (11)$$

对式(8)求小扰动增量得

$$\Delta P_e = E'_q U_m \cos \theta_0 \Delta \theta / x_1 \quad (12)$$

对式(10)求小扰动增量,可得  $\Delta \theta = C_0 \Delta \delta$ , 其中

$$C_0 = \frac{x_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)}{x_2 E'_q \cos \theta_0 + x_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)} > 0 \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得

$$\Delta P_e = E'_q U_m \cos \theta_0 C_0 \Delta \delta / x_1 \quad (14)$$

将式(14)代入式(9)得

$$Hs^2 \Delta \delta + Ds \Delta \delta + \omega_0 E'_q U_m \cos \theta_0 C_0 \Delta \delta / x_1 = 0 \quad (15)$$

式(15)表明,在恒定有功功率和无功纯电压控制下,只能增加系统的同步转矩系数,可使故障后发电机的减速面积增加,从而提高系统第一摆稳定性(暂态稳定),但不能增加系统的阻尼转矩,因此为增加系统的阻尼,就必须允许有功功率或电压在某个范围内有一定的波动<sup>[19-20]</sup>。

#### 4.3 光伏发电系统控制方式 2

有功无附加阻尼控制,无功加入附加阻尼控制,控制框图如图 8 所示,其中  $K_w$  为比例控制系数。

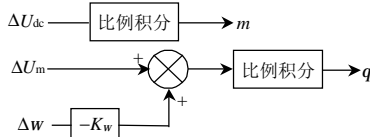


图 8 无功附加控制  
Fig. 8 With additional control of reactive power only

无功附加控制时有

$$\Delta P = 0, \Delta U_m - K_w \Delta \omega = 0 \text{ 即 } \Delta U_m = K_w \Delta \omega \quad (16)$$

对式(8)求小扰动增量得

$$\Delta P_e = \frac{E'_q U_{m0}}{x_1} \cos \theta_0 \Delta \theta + \frac{E'_q}{x_1} \sin \theta_0 \Delta U_m \quad (17)$$

对式(10)求小扰动增量得

$$\frac{E'_q U_{m0}}{x_1} \cos \theta_0 \Delta \theta + \frac{E'_q}{x_1} \sin \theta_0 \Delta U_m =$$

$$\frac{U_{m0} U_s}{x_2} \cos(\delta_0 - \theta_0) \cdot \Delta \delta - \frac{U_{m0} U_s}{x_2} \cos(\delta_0 - \theta_0) \Delta \theta +$$

$$\frac{U_s}{x_2} \sin(\delta_0 - \theta_0) \Delta U_m \quad (18)$$

结合式(16)有  $\Delta \theta = C_0 \Delta \delta + C_1 K_w s \Delta \delta$ , 其中

$$C_1 = \frac{x_1 U_s \sin(\delta_0 - \theta_0) - x_2 E'_q \sin \theta_0}{x_2 E'_q U_{m0} \cos \theta_0 + x_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)} \quad (19)$$

将式(19)代入式(17)得

$$\Delta P_e = \frac{E'_q U_{m0}}{x_1} \cos \theta_0 (C_0 \Delta \delta + C_1 K_w s \Delta \delta) + \frac{E'_q}{x_1} \sin \theta_0 K_w s \Delta \delta \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得阻尼系数

$$D_1 = D + B_1 K_w \quad (21)$$

其中  $B_1 = \frac{\omega_0 E'_q U_s \sin \delta_0}{x_2 E'_q \cos \theta_0 + x_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)}$ 。

由于  $B_1 > 0$ , 因此当  $K_w > 0$  时,  $D_1 > D$ 。这表明了在这种控制方式下,系统的阻尼将增加。

#### 4.4 光伏发电系统控制方式 3

调节其有功功率和无功附加阻尼控制来抑制振荡。控制框图如图 9 所示。

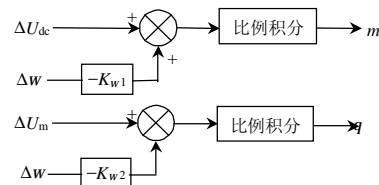


图 9 有功、无功附加控制  
Fig. 9 With additional control of P & Q

直流侧功率  $P_{PV}$  = 交流侧有功功率  $P$  + 逆变器损耗  $P_{loss}$ 。调节交流侧有功功率即调节光伏电池发出直流侧功率,为利用光伏电池系统抑制功率振荡,正常运行时应使有功初始值  $P_{PV0} < P_{PVmax}$ , 使有功具有双向调节的能力。使光伏电池工作在电压源区,如图 10 所示,这样直流侧电压的变化比在电流源区小得多,有利于逆变器的正常运行,直流侧电压在最大功率电压  $U_m$  和开路电压  $U_{oc}$  间变化,功率可在最大功率  $P_{PVmax}$  与零之间变化。 $U_{dc}$  增大,  $P_{PV}$  减小,即交流侧输出有功  $P$  减小。

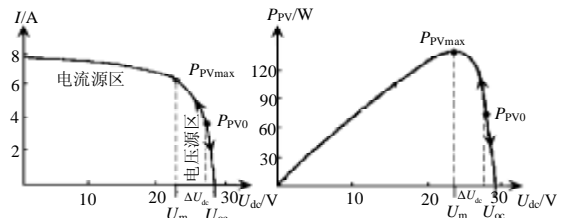


图 10 调节有功工作区  
Fig. 10 Active power regulated area



$$\Delta U_{dc} - K_{\omega 1} \Delta \omega = 0 \Rightarrow \Delta U_{dc} = K_{\omega 1} \Delta \omega$$

由于  $\Delta U_{dc}$  与  $\Delta P$  反向，为简化分析可设

$$\Delta P = -K_{\omega 1} \Delta \omega, \quad \Delta U_m = K_{\omega 2} \Delta \omega \quad (22)$$

对式(10)求小扰动增量得

$$\frac{E'_q U_{m0}}{x_1} \cos \theta_0 \Delta \theta + \frac{E'_q}{x_1} \sin \theta_0 \Delta U_m + \Delta P =$$

$$\frac{U_{m0} U_s}{x_2} \cos(\delta_0 - \theta_0) \Delta \delta - \frac{U_{m0} U_s}{x_2} \cos(\delta_0 - \theta_0) \Delta \theta + \frac{U_s}{x_2} \sin(\delta_0 - \theta_0) \Delta U_m \quad (23)$$

结合式(22)有  $\Delta \theta = C_0 \Delta \delta + C_1 K_{\omega 2} s \Delta \delta + C_2 K_{\omega 1} s \Delta \delta$ ，其中

$$C_2 = \frac{x_1 x_2}{x_2 E'_q U_{m0} \cos \theta_0 + x_1 U_s U_{m0} \cos(\delta_0 - \theta_0)} \quad (24)$$

将式(24)代入式(17)得

$$\Delta P_e = \frac{E'_q U_{m0}}{x_1} \cos \theta_0 (C_0 \Delta \delta + C_1 K_{\omega 2} s \Delta \delta + C_2 K_{\omega 1} s \Delta \delta) + \frac{E'_q}{x_1} \sin \theta_0 K_{\omega 2} s \Delta \delta \quad (25)$$

将式(25)代入式(9)可得阻尼系数

$$D_2 = D + B_1 K_{\omega 2} + B_2 K_{\omega 1}, \quad B_2 = \frac{\omega_0 E'_q U_{m0}}{x_1} \cos \theta_0 C_2 \quad (26)$$

由于  $B_1 > 0$ ,  $B_2 > 0$ ，因此，当  $K_{\omega 1} > 0$ ,  $K_{\omega 2} > 0$  时，有  $D_2 > D_1 > D$ ，系统的阻尼将进一步增加。这说明有功参与调节后阻尼增大更多，抑制振荡效果将更好。

### 5 仿真结果

单机无穷大系统等值电路如图 11 所示， $P_0$  和

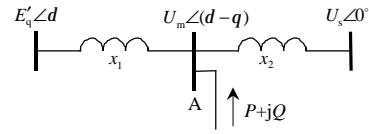


图 11 单机无穷大系统等值电路  
Fig. 11 Equivalence circuit of a single-machine infinite bus system

$P_{PV0}$  分别为  $P$  和  $P_{PV}$  的初值。在标幺制下，设发电机额定容量  $S=1.0$ ，光伏电池最大容量  $P_{PVmax}=0.26$ 。系统正常运行时参数如下： $P_0=0.12$ ,  $P_{PV0}=0.13$ ,  $P_e=0.63$ ,  $x_1=0.25$ ,  $U_s=1.0 \angle 0^\circ$ ,  $E'_q=1.0 \angle 20^\circ$ ,  $U_m=0.99 \angle 10.85^\circ$ ,  $x_2=0.25$ 。  $t=3$  s 时，从发电机到光伏系统注入点 A 的线路中点处发生三相短路故障，0.1 s 后故障排除后线路恢复运行。

光伏发电采用前述 3 种控制方式。方式 1 为光伏电站有功  $P$  维持恒定为  $P_0$ ，无功  $Q$  采用纯电压控制，没有附加阻尼控制。方式 2 为加入无功附加阻尼控制抑制振荡，无功极限为  $\pm 0.3$ ，有功仍不参与调节。方式 3 为同时控制有功、无功抑制振荡。仿真结果曲线如图 12 所示。

由图 12 可以看出，系统发生故障时，由于系统阻尼不足，功角发生振荡。在控制方式 1 下，光伏发电系统不参与抑制振荡，振荡持续进行，无功纯电压控制使故障后  $U_m$  保持恒定。采用无功附加控制(控制方式 2)后阻尼有所增加，振荡衰减，这是以牺牲  $U_m$  恒定为代价的，当然  $U_m$  波动限制在一定的范围内。当有功参与调节(控制方式 3)后阻尼进一步增大，振荡衰减更快，抑制效果更好。有功抑制振荡的性能直接与光伏电池容量有关，容量越大对系统提供

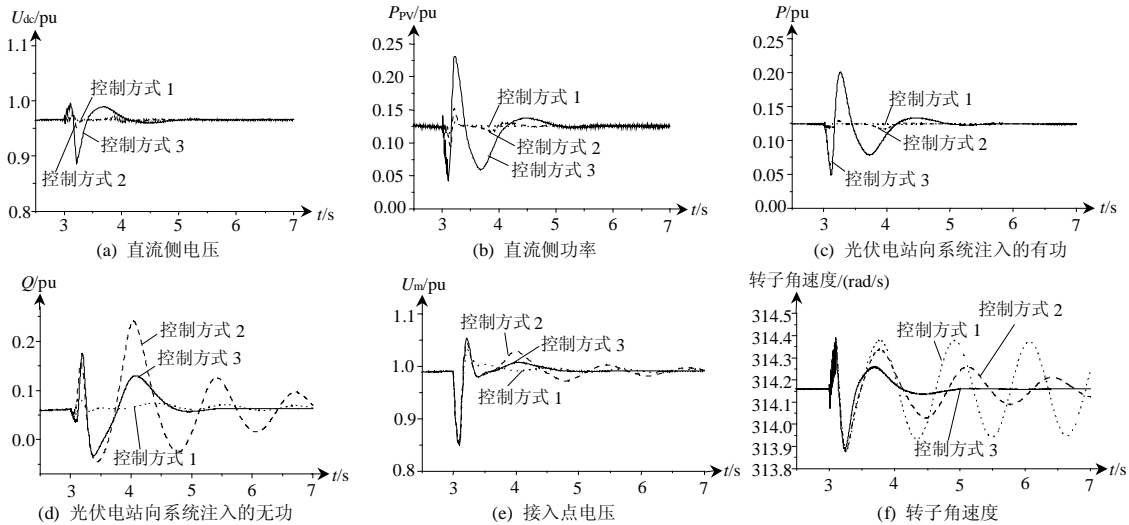


图 12 仿真结果曲线  
Fig. 12 Simulation curves

的支持越好。上述仿真结果与理论分析相一致。

## 6 结论

(1) 对光伏发电系统的有功、无功的适当控制, 可以增加单机无穷大系统的阻尼。

(2) 大容量光伏发电系统能够有效地抑制单机无穷大系统功率振荡。

## 参考文献

- [1] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [2] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. PSS控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 7-11.  
Zhao Shuqiang, Chang Xianrong, He Renmu, et al. Borrow damping phenomena and negative damping effect of PSS control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 7-11(in Chinese).
- [3] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网互联对互联电力系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.  
Yu Yixin, Li Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11(in Chinese).
- [4] 樊爱军, 雷宪章, 刘红超, 等. 研究大规模互联电网区域间振荡的特征值分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 35-39.  
Fan Aijun, Lei Xianzhang, Liu Hongchao, et al. Eigenvalue analysis methods for interarea oscillations in large-scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 35-39(in Chinese).
- [5] 杨立强, 王亮, 赵红光, 等. 加速功率型电力系统稳定器的研制[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 57-60,80.  
Yang Liqiang, Wang Liang, Zhao Hongguang, et al. Development of power system stabilizer based on PSS2A model of IEEE[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 57-60,80(in Chinese).
- [6] 黄莹, 徐政, 潘武略. 基于 PSS/E 的华东电网低频振荡分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 11-17.  
Huang Ying, Xu Zheng, Pan Wulue. Analysis method for low frequency oscillation in east China power grid based on power system simulation software PSS/E[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 11-17(in Chinese).
- [7] Li G J, Lie T T, Shrestha G B, et al. Implementation of coordinated multiple FACTS controllers for damping oscillations[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2000, (22): 79-92.
- [8] 徐桂枝, 武守远, 王宇红, 等. 用 TCSC 装置抑制电力系统低频振荡的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 45-47.  
Xu Guizhi, Wu Shouyuan, Wang Yuhong, et al. Damping low frequency oscillation in power system by TCSC[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 45-47(in Chinese).
- [9] 郭春林, 童陆园. 多机系统中可控串补(TCSC)抑制功率振荡的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 1-6.  
Guo Chunlin, Tong Luyuan. Application of TCSC to damp oscillations in multi-machine systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 1-6 (in Chinese).
- [10] 李可军, 赵建国, 孙海顺. 一种可控串联补偿动态模拟实验装置[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 71-75.  
Li Kejun, Zhao Jianguo, Sun Haishun. An experimental device for dynamic simulation of thyristor controlled series compensation [J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 71-75(in Chinese).
- [11] 林宇锋, 徐政, 黄莹. TCSC 功率振荡阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 36-39.  
Lin Yufeng, Xu Zheng, Huang Ying. Design of TCSC auxiliary controller for inter-area power oscillation damping[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 36-39(in Chinese).
- [12] 荆勇, 洪潮, 杨晋柏, 等. 直流调制抑制南方电网区域功率振荡的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 53-56.  
Jing Yong, Hong Chao, Yang Jinbai, et al. Suppression of inter-area power oscillation in southern China power grid by HVDC modulation[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 53-56(in Chinese).
- [13] Liu F, Mei S W, Xia D M, et al. Experimental evaluation of nonlinear robust control for SMES to improve the transient stability of power systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(4): 774-782.
- [14] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 73-77.  
Wu Libo, Zhao Zhengming, Liu Jianzheng, et al. Research on the stability of MPPT strategy applied in single-stage grid-connected photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 73-77(in Chinese).
- [15] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.  
Su Jianhui, Yu Shijie, Zhao Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412(in Chinese).
- [16] Park M, Yu I K. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(1): 164-169.
- [17] Zhang L, Al-Amoud A, Bai Y F. Real-time maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems[C]. IEE Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, London, 2000: 124-129.
- [18] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [19] Ying Y, Chen J Y, Han Y D. STATCOM modeling and analysis in damping power system oscillations[C]. 35<sup>th</sup> Intersociety IEEE Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, Las Vegas, 2000, 2: 756-762.
- [20] 马幼捷, 周雪松. 静止无功补偿器非线性控制对系统功角稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 84-88.  
Ma Youjie, Zhou Xuesong. Study on nonlinear SVC control for improving power system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 84-88 (in Chinese).

收稿日期: 2006-06-12.

作者简介:

龙源(1983—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析及光伏发电并网技术;

李国杰(1965—), 男, 副教授, 从事电力系统分析与控制及新能源的研究工作;

程林(1973—), 男, 讲师, 从事电力系统分析与控制及可靠性的研究工作;

孙元章(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统分析与控制的研究工作。

(责任编辑 马晓华)