

光伏电站附加阻尼控制器及控制参数优化设计

艾松波^{1,2}, 唐欣¹, 王红亚³

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网江西省电力有限公司检修分公司, 江西 南昌 330000;
3. 国网江西省电力有限公司培训中心, 江西 南昌 330000)

摘要:随着光伏发电的发展,大规模光伏电站并网对电力系统稳定性影响日益显著。光伏并网逆变器引入阻尼控制有助于增大电力系统的阻尼,然而阻尼控制参数太大会引起新振荡模式。在此背景下,建立光伏电站接入单机无穷大系统的小信号模型,分析光伏电站并网对系统阻尼的影响,并设计光伏并网有功附加阻尼控制器,从理论上分析附加阻尼控制器对系统阻尼的贡献。此外,基于系统根轨迹阐明附加阻尼控制系数过大影响系统稳定性的机理,进而给出系统最大阻尼时控制参数的计算方法。最后,采用 PSCAD 软件进行仿真,验证理论分析与计算的正确性。

关键词:光伏电站;低频振荡;附加阻尼控制;小信号模型;单机无穷大系统

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.003 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2020)06-0021-07

Optimal design of additional damping controller and control parameters for photovoltaic power station

AI Songbo^{1,2}, TANG Xin¹, WANG Hongya³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. Maintenance branch, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330000, China;
3. Training Center, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: With the development of photovoltaic power generation, large-scale photovoltaic plants grid-connection has a significant impact on power system stability. A damping control introduced in photovoltaic grid-connected inverters helps to increase the damping of the power system. However, too large a damping control parameter causes a new oscillation mode. Under this background, a small-signal model is established for photovoltaic plants connected to a single-machine infinite bus system to analyze the influence of photovoltaic plants grid-connection on system damping and design active power additional damping controller for the photovoltaic grid-connection. Furthermore, the contribution of the additional damping controller is theoretically analyzed to the system damping, and the system root locus is utilized to clarify the mechanism of oversize additional damping control coefficient affecting the system stability. And then, the computation method of the control parameters is proposed when the system is at the maximum damping. Finally, the correctness of the theoretical analysis is verified by the simulation on PSCAD software.

Key words: photovoltaic plants; low frequency oscillation; additional damping control; small signal model; single-machine infinite bus system

收稿日期:2018-05-06;修回日期:2019-04-10

基金项目:国家自然科学基金(51577014)

通信作者:艾松波(1993-),男,硕士研究生,主要从事高压直流输电研究;975451887@qq.com

近年来,中国新能源发电发展迅猛,随着光伏发电技术的进步和成本的降低,光伏发电的比重越来越高。大型光伏电站的发电效益愈加明显,在青海、甘肃、蒙西等西部地区,已经建成并投入使用大规模光伏电站。大规模光伏电站并网对电力系统稳定性影响日益显著,同时也为抑制低频振荡提供了新途径^[1]。

目前,广泛应用电力系统稳定器(PSS)^[2-6]抑制电力系统功率振荡,但PSS具有装设地点易受限制的缺点。为此,研究人员在柔性功率调节器^[7]、储能装置^[8]、高压直流输电^[9-10]和风力发电^[11]等装置引入附加控制,对抑制电网低频振荡有一定的贡献。

在光伏并网对系统功率振荡影响方面,国内外学者已做了大量的研究工作。文献[12]为研究光伏并网对单机无穷大系统振荡特性的影响,采用了阻尼转矩分析法,随着光伏有功出力的波动,光伏电站向发电机振荡回路提供的阻尼转矩也将发生变化,其阻尼转矩值可能为正,也可能为负;文献[13-15]分别采用极点配置法、鲁棒控制和相位补偿法对控制参数进行了设计,为系统提供正阻尼。这些方法往往需要比较精确的系统参数,且参数设计较复杂。基于功率调制的阻尼控制方法^[16]具有算法简单和物理意义明确等优点,因而易于工程应用。为提高阻尼能力,文献[17]提出根据低频振荡频率自适应调整有功阻尼系数;文献[18]利用自抗扰控制取代比例阻尼系数产生阻尼功率。然而,为避免阻尼系数太大而引起系统不稳定,在功率调制方法中,需进一步研究其参数取值范围及参数对系统阻尼的影响规律。

该文以光伏电站接入单机无穷大系统为例,设计光伏电站有功附加阻尼控制器,从理论上证明附加阻尼控制器能够增大系统的阻尼。该文考虑功率环的影响,建立系统小信号模型,进而绘出系统根轨迹,阐明阻尼控制系数的限制性条件,并利用盛金公式给出维持系统稳定的最大阻尼系数的计算方法。

1 系统模型

光伏电站接入单机无穷大系统的模型如图1所示, E'_q 为同步发电机 q 轴暂态电动势, U_s 为无穷大系统母线电压, U_v 为光伏电站接入点电压, u_{dc} 为光

伏阵列输出直流电压, U_{pv} 为光伏电站并网逆变器输出端电压; δ 为 E'_q 与 U_s 之间的相角差, θ 为 E'_q 与 U_v 之间的相角差, δ' 为 U_{pv} 与 U_v 之间的相角差; P_g 、 Q_g 分别为发电机所发出的有功、无功, P_v 、 Q_v 分别为逆变器注入到系统的有功、无功, P_s 、 Q_s 分别为发电机与逆变器输出的有功、无功之和; X_1 为发电机暂态电抗 X'_d 与线路电抗之和, X_2 为无穷大系统侧线路电抗, X_v 为光伏电站升压变压器的逆变器侧线路电抗与变压器漏抗之和。

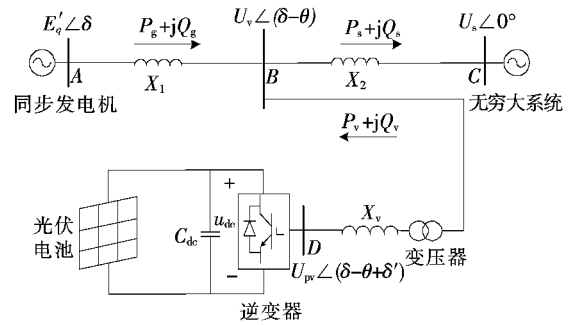


图1 含光伏电站的单机无穷大系统结构

Figure 1 The diagram of the single-machine infinite-bus system with photovoltaic power station

1.1 同步发电机建模

为了简化分析和计算,采用经典二阶模型模拟同步发电机,并假设其暂态电动势 E'_q 与机械功率 P_m 均恒定,其单机无穷大系统运动方程为

$$\begin{cases} H \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_g - D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \end{cases} \quad (1)$$

其小扰动运动方程可写成:

$$Hp^2 \Delta\delta + Dp \Delta\delta + \Delta P_g = 0 \quad (2)$$

式中 H 为同步发电机惯性时间常数; ω 为电角速度; D 为阻尼系数; p 为微分算子 d/dt 。

1.2 基系统阻尼小信号建模分析

系统的等效电路如图2所示,其中 U'_{pv} 、 X'_v 为 U_{pv} 、 X_v 折算到电网侧后的量。

由功角方程可知:

$$P_g = \frac{E'_q U_v \sin \theta}{X_1} \quad (3)$$

$$P_s = \frac{U_s U_v \sin(\delta - \theta)}{X_2} \quad (4)$$

忽略线路损耗,系统稳态潮流符合公式:

$$P_g = P_s - P_v \quad (5)$$

对式(3)、(4)求小扰动增量,分别得到:

$$\Delta P_g = \frac{E'_q U_v \cos \theta_0}{X_1} \Delta \theta \quad (6)$$

$$\Delta P_s = \frac{U_s U_v \cos(\delta_0 - \theta_0)}{X_2} (\Delta \delta - \Delta \theta) \quad (7)$$

式中 δ_0, θ_0 分别为系统稳态工作点 E'_q 与 U_s 之间、 E'_q 与 U_v 之间的相角差; $\Delta \delta, \Delta \theta$ 为变量。

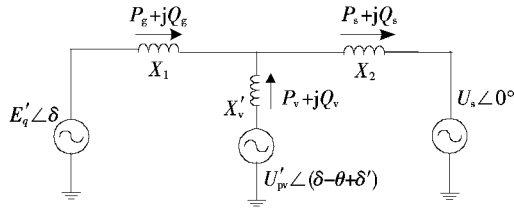


图 2 光伏并网系统等效电路

Figure 2 Equivalent circuit diagram of photovoltaic grid-connected system

由式(5)得到:

$$\frac{E'_q U_v \cos \theta_0}{X_1} \Delta \theta = \frac{U_s U_v \cos(\delta_0 - \theta_0)}{X_2} \Delta \delta - \frac{U_s U_v \cos(\delta_0 - \theta_0)}{X_2} \Delta \theta - \Delta P_v \quad (8)$$

求得:

$$\Delta \theta = K \Delta \delta - K \frac{X_2}{U_s U_v \cos(\delta_0 - \theta_0)} \Delta P_v \quad (9)$$

其中, $K = \frac{X_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)}{X_2 E'_q \cos \theta_0 + X_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)}$ 。

将 $\Delta \theta$ 代入式(6)得到:

$$\Delta P_g = \frac{E'_q U_v \cos \theta_0}{X_1} K \Delta \delta - \frac{X_2 E'_q \cos \theta_0}{X_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)} K \Delta P_v \quad (10)$$

将式(10)代入式(2)可得:

$$H p^2 \Delta \delta + D p \Delta \delta + \frac{E'_q U_v \cos \theta_0}{X_1} K \Delta \delta - \frac{X_2 E'_q \cos \theta_0}{X_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)} K \Delta P_v = 0 \quad (11)$$

在并网逆变器采用定直流和定交流电压控制方式下,无附加阻尼控制时控制框图如图 3 所示,此时 $\Delta P_v = 0$,由式(11)可得:

$$H p^2 \Delta \delta + D p \Delta \delta + \frac{E'_q U_v \cos \theta_0}{X_1} K \Delta \delta = 0 \quad (12)$$

由式(12)可知,无附加阻尼控制时系统阻尼不变。

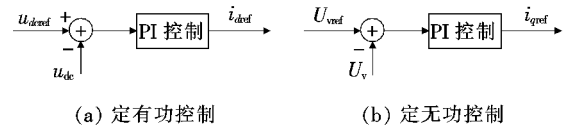


图 3 无附加阻尼控制

Figure 3 No additional damping control block diagram

2 光伏电站附加阻尼控制

光伏发电系统逆变器并联采用有功—电压频率(P-f)、无功—电压功率(Q-U)下垂控制来实现功率的平均分配,用来解决逆变器并联运行出现的环流问题。以有功—电压频率(P-f)为例,下垂控制算法可表示为 $\omega_{ref} = \omega_n - m_i p_i$,如图 4 所示,其中 ω_{ref} 为逆变器实际输出角频率, ω_n 为空载时逆变器输出角频率, m_i 为下垂系数, P_i 为逆变器输出有功功率。

不同于下垂控制,附加阻尼控制用于单台逆变器,进而增加系统阻尼,稳定运行时并不会影响系统潮流的设定值。

以同步发电机角频率的变化量 $\Delta \omega$ 作为附加阻尼控制器的输入信号,输出信号为 U_m ,设计附加阻尼控制器,其控制框图如图 5 所示。

$$u_{deref} = u_{deset} + K_\omega \Delta \omega \quad (13)$$

式中 u_{deset} 为系统稳定运行时直流电压设定值; u_{deref} 为加入附加阻尼控制后的定直流电压参考值; K_ω 为阻尼控制系数。

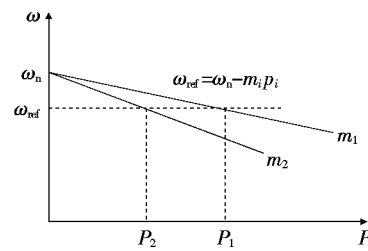


图 4 有功下垂控制

Figure 4 Active droop control

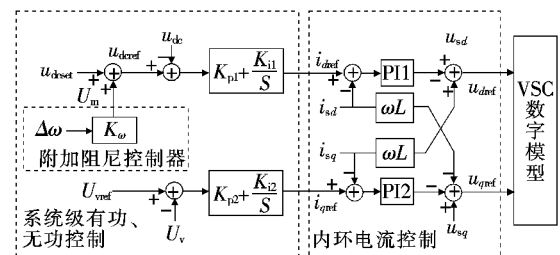


图 5 逆变器附加阻尼控制

Figure 5 Inverter additional damping control block diagram

2.1 加入附加阻尼控制器的系统小信号模型

稳态时并网逆变器无功采用定交流电压控制, 可认为 U_v 不变; 有功采用附加阻尼控制。由式 (11) 可知, ΔP_v 中应存在提供系统阻尼的阻尼项。

直流侧电容存储的能量满足 $P_{dc} = 0.5C_{dc}u_{dc}^2$, 对其求小扰动增量, 得到:

$$\Delta P_{dc} = C_{dc}u_{dc0}\Delta u_{dc} \quad (14)$$

式中 u_{dc0} 为 u_{dc} 的静态工作点电压; C_{dc} 为直流侧电容的值; ΔP_{dc} 为系统受到小扰动后直流功率的增量; Δu_{dc} 为变量。在忽略并网逆变器损耗的情况下, 有 $\Delta P_v = \Delta P_{dc}$, 由图 4 可得:

$$\left(K_{\omega}\Delta\omega(s) - \frac{\Delta P_v(s)}{C_{dc}u_{dc0}}\right) \cdot \left(K_{pl} + \frac{K_{il}}{s}\right) = \Delta i_{sd}(s) \quad (15)$$

取电网电压的方向为 d 轴方向, 有

$$P_v = \frac{3U_v i_{sd}}{2} \quad (16)$$

结合功角方程 $P_v = U_v U'_{pv} \sin \delta' / X'_v$, 可以得到:

$$i_{sd} = \frac{2U'_{pv} \cos \delta'_0}{3X'_v} \Delta\delta' \quad (17)$$

对式 (17) 求小扰动增量可得:

$$\Delta i_{sd} = \frac{2U'_{pv} \cos \delta'_0}{3X'_v} \Delta\delta' \quad (18)$$

根据 $d\Delta\delta/dt = \Delta\omega = d\Delta\delta'/dt$, 式 (17) 可改写为

$$\frac{d\Delta i_{sd}}{dt} = \frac{2U'_{pv} \cos \delta'_0}{3X'_v} \cdot \frac{d\Delta\delta'}{dt} \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (15), 整理后得到:

$$\Delta P_v(s) = C_{dc}u_{dc0}K_{\omega}\Delta\omega(s) - \frac{2U'_{pv} \cos \delta'_0 s \Delta\delta'(s)}{3X'_v(K_{pl}S + K_{il})} \quad (20)$$

由于 $\Delta\omega(s) = d\Delta\delta'/dt = s\Delta\delta'(s)$, 由式 (20) 可见, ΔP_v 中存在增加同步电机阻尼的阻尼项:

$$C_{dc}u_{dc0}K_{\omega} - \frac{2U'_{pv} \cos \delta'_0}{3X'_v(K_{pl}S + K_{il})} \quad (21)$$

将式 (20) 代入式 (11) 得到系统的 s 域方程:

$$Hs^2\Delta\delta(s) + Ds\Delta\delta(s) + \frac{E'_q U_v \cos \theta_0}{X_1} K \Delta\delta(s) - \frac{X_2 E'_q \cos \theta_0}{X_1 U_s \cos(\delta_0 - \theta_0)} K \cdot \left(\frac{2U'_{pv} \cos \delta'_0 \Delta\delta'(s)s}{3X'_v(K_{pl}S + K_{il})} + C_{dc}u_{dc0}K_{\omega}\Delta\omega(s) \right) = 0 \quad (22)$$

整理可得:

$$HK_{pl}s^3\Delta\delta(s) + (HK_{il} + DK_{pl} - \frac{KE'_q X_2 K_{pl} K_{\omega} \cos \theta_0}{U_s X_1 \cos(\delta_0 - \theta_0)}) \cdot s^2\Delta\delta(s) + (DK_{il} + \frac{E'_q U_v K K_{pl} \cos \theta_0}{X_1} - \frac{E'_q X_2 C_{dc} u_{dc0} K K_{il} K_{\omega} \cos \theta_0}{U_s X_1 \cos(\delta_0 - \theta_0)} + \frac{2E'_q U'_{pv} X_2 K \cos \theta_0 \cos \delta'_0}{3U_s X_1 X'_v \cos(\delta_0 - \theta_0)}) \cdot s\Delta\delta(s) + \frac{E'_q U_v K K_{il} \cos \theta_0}{X_1} = 0 \quad (23)$$

2.2 系统根轨迹

如图 6 所示, 根据式 (23) 利用 MATLAB 绘出 K_{ω} 从 0 开始变化到 3 时系统的根轨迹, 图中控制参数如表 1 所示。从图 6 中可以看出, 最初时系统的根都在坐标系左半平面, 随着 K_{ω} 的变大, 开始出现右半平面的根。从 MATLAB 数据中得出, 当 $K_{\omega} = 2.5$ 时, 一对共轭复根的实部和实数根为 0, 即 $K_{\omega} \geq 2.5$ 时系统不稳定。

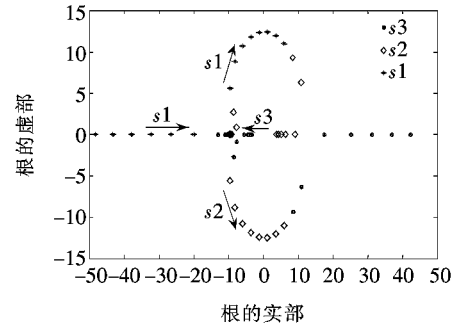


图 6 K_{ω} 变化时系统的根轨迹

Figure 6 Root locus of the system when K_{ω} changes

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	单位	数值	参数	单位	数值
E'_q	kV	12.79	X_1	Ω	1.080
U_v	kV	12.29	X_2	Ω	0.630
U_s	kV	13.79	X'_v	Ω	0.190
U_{pv}	kV	15.70	K_{pl}	—	0.050
D	—	32.00	K_{il}	—	0.911
H	s	3.17	$\cos \theta_0$	—	1.000
ω_{ref}	rad/s	100π	$\cos(\delta_0 - \theta_0)$	—	0.899
$\cos \delta'_0$	—	0.96			

2.3 系统最大阻尼时控制参数的计算方法

由图 6 可以看出,共轭极点 s_1 和 s_2 为主导极点。 K_ω 较小时主导极点 s_1 和 s_2 远离虚轴,与另一极点 s_3 重合,系统出现重根;随着 K_ω 的增大,这一对主导极点 s_1 和 s_2 渐渐向虚轴靠近,这表明,当 K_ω 较小、系统出现重根时,系统的阻尼最大。因而在这一特定环境下,可以利用盛金公式给出的重根判断条件,即

$$\Delta = M_2^2 - 4M_1M_3 = 0 \quad (24)$$

其中

$$\begin{cases} M_1 = b^2 - 3ac \\ M_2 = bc - 9ad \\ M_3 = c^2 - 3bd \\ a = HK_{pl} \\ b = HK_{il} + DK_{pl} - \frac{KE'_q X_2 K_{pl} C_{dc} u_{dc0} K_\omega \cos \theta_0}{U_s X_1 \cos(\delta_0 - \theta_0)} \\ c = DK_{il} + \frac{E'_q U_v K K_{pl} \cos \theta_0}{X_1} - \frac{E'_q X_2 K K_{il} C_{dc} u_{dc0} K_\omega \cos \theta_0}{U_s X_1 \cos(\delta_0 - \theta_0)} \\ d = \frac{2E'_q U'_{pv} X_2 K \cos \theta_0 \cos \delta'_0}{3U_s X_1 X'_v \cos(\delta_0 - \theta_0)} - \frac{E'_q U_v K K_{il} \cos \theta_0}{X_1} \end{cases}$$

求出为系统提供最大阻尼的 K_ω , 并且根据表 1 参数可求得符合条件的 $K_\omega = 1.7$ 。

3 仿真分析

该文通过仿真软件 PSCAD/EMTDC 按照图 1 搭建仿真模型,验证所提方法的有效性和理论分析的正确性。线路参数和同步发电机的参数见表 1。在 $P_g = 62.3 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的工况下,当仿真运行到 3.0 s 时,在图 1 A、B 的中点处发生三相短路故障,故障持续时间为 0.1 s,故障排除后系统恢复运行。

3.1 附加阻尼控制对低频振荡的阻尼效果

引入附加阻尼控制前、后同步发电机输出有功功率 P_g 、接入点电压 U_v 、同步角速度 ω 的仿真波形

分别如图 7~9 所示,当故障发生后,系统发生了频率约为 0.9 Hz 的功率振荡。无附加控制时,在发电机与电网自身弱阻尼的作用下,发电机输出功率波动逐渐变小,呈弱减幅振荡状态,在一段时间后,能够恢复稳定运行状态,但持续时间较长。有附加阻尼控制时,系统阻尼明显增大,振荡快速衰减到平衡位置。

由图 7~9 还可以看出,不同的控制参数 K_ω 对系统功率振荡有不同的抑制效果, $K_\omega = 2$ 时比 $K_\omega = 1$ 时振荡衰减得更快,抑制效果更好,并且在一定范围内控制参数越大,抑制效果越明显。

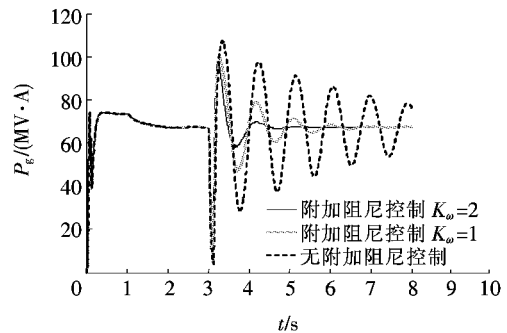


图 7 同步发电机输出有功功率
Figure 7 Active power output from synchronous generator

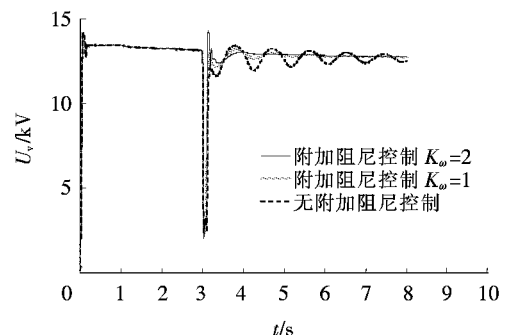


图 8 接入点电压
Figure 8 Voltage at point of common coupling

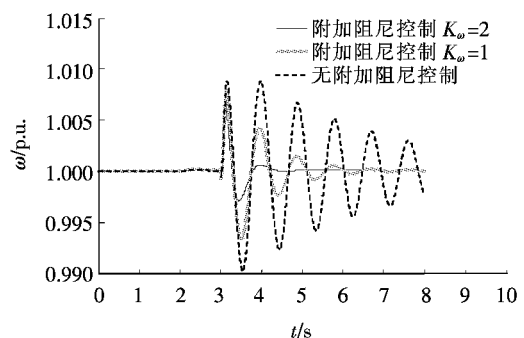


图 9 同步角速度
Figure 9 Synchronous angular velocity

3.2 控制参数过大对系统稳定性的影响

K_w 为 1.0、1.7、2.3 时同步发电机输出有功功率 P_g 的局部对比如图 10 所示,虽然 $K_w=2.3$ 比 $K_w=1.0$ 能够更快地抑制系统功率振荡,但是同时也会出现新的振荡模式,当 $K_w=1.7$ 时,系统恢复平稳的速度最快,与文 2.3 节理论分析一致。

$K_w=2.5$ 时同步发电机输出有功功率 P_g 、接入点电压 U_v 的输出特性分别如图 11、12 所示,图中波形表明,随着 K_w 的继续增大,系统失稳。

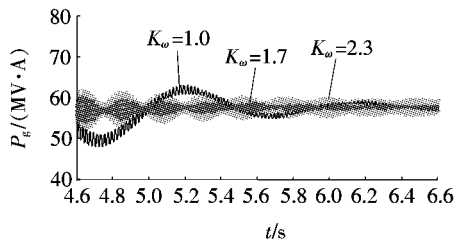


图 10 同步发电机输出功率局部示意

Figure 10 Local diagram of synchronous generator output active power

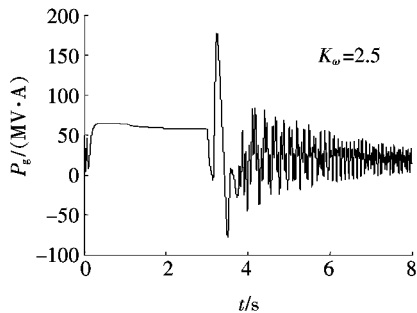


图 11 同步发电机输出功率

Figure 11 Active power output from synchronous generator

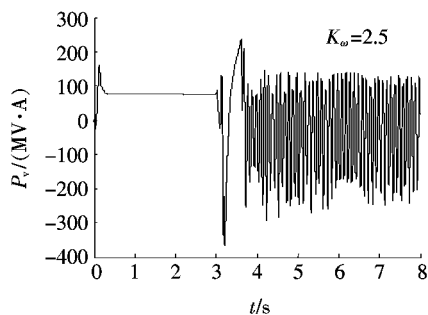


图 12 接入点电压

Figure 12 Voltage at point of common coupling

4 结语

该文设计了光伏电站抑制电网低频振荡的有功附加阻尼控制器,建立系统小信号模型,绘出系统根

轨迹,通过理论和仿真分析得出如下结论:

1) 光伏逆变器采用定有功和定交流电压控制方式时不改变系统阻尼,附加阻尼控制器能够增大系统阻尼从而抑制低频振荡;

2) 附加阻尼控制系数 K_w 并不是越大越好,借助 MATLAB 的根轨迹分析和盛金公式,对于三阶系统,可以求出为系统提供最大阻尼的控制参数 K_w 。

参考文献:

- [1] 高海翔,伍双喜,苗璐,等. 发电机组引发电网功率振荡原因及其抑制措施研究综述[J]. 智慧电力, 2018, 45(7): 49-55+66.
GAO Haixiang, WU Shuangxi, MIAO Lu, et al. Overview of reasons for generator-induced power oscillations & its suppression measures[J]. Smart Power, 2018, 45(7): 49-55+66.
- [2] 刘翔宇,李晓明,李世辉,等. 应用开环补偿原理整定 PSS 参数的准确性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 157-164.
LIU Xiangyu, LI Xiaoming, LI Shihui, et al. Accuracy analysis of PSS parameter setting based on open-loop compensation principle [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 157-164.
- [3] 雷阳,何信林,段建东,等. 多机互联系统下的 PSS 性能分析[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9): 50-56.
LEI Yang, HE Xinlin, DUAN Jiandong, et al. Performance analysis of PSS in multi machine interconnected system[J]. Power Grid and Clean Energy, 2019, 35(9): 50-56.
- [4] 王官宏,李莹,余耀,等. 提高集中电源外送系统输电能力的发电机励磁系统协调优化[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 105-111.
WANG Guanhong, LI Ying, YU Yao, et al. Coordinated optimization of generator excitation system for improving the transmission capacity of centralized power transmission system[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 105-111.
- [5] 陈子文. 标准测试系统中 PSS 参数协同优化与配置研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 153-158.
CHEN Ziwen. Coordinated optimization and placement of PSS in IEEE-57 bus system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 153-158.
- [6] 方连航,刘红岩,梁钰,等. 环境激励下电力系统外在表

- 征及振荡识别方法研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5):114-120.
- FANG Lianhang, LIU Hongyan, LIANG Yu, et al. Characteristics of electromechanical responses and identification undergoing slight ambient excitation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5):114-120.
- [7] 陈仲伟, 邹旭东, 段善旭, 等. 利用柔性功率调节器抑制电力系统功率振荡[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 196-204.
- CHEN Zhongwei, ZOU Xudong, DUAN Shanxu, et al. Mitigating the power oscillation by the flexible power conditioner[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3):196-204.
- [8] 刘红翠, 王德林, 李芸. SMES抑制电力系统功率振荡的控制策略研究[J]. 电网技术, 2014, 38(11):3128-3133.
- LIU Hongcui, WANG Delin, LI Yun. Research on control strategy to suppress power oscillation in power grid by superconducting magnetic energy storage[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3128-3133.
- [9] WANG Juanjuan, FU Chuang, ZHANG Yao. Design of WAMS-based multiple HVDC damping control system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 363-374.
- [10] 俞翔, 陈乐, 邹强, 等. 特高压直流单换流器退出引起过压问题的分析及优化[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 145-150+155.
- YU Xiang, CHEN Le, ZOU Qiang. Analysis and optimization of overvoltages in UHVDC project caused by exiting of converter [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6):145-150+155.
- [11] 蒋平, 史豪, 吴熙. 风电功率波动引发的强迫振荡扰动源定位方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5):1-6.
- JIANG Ping, SHI Hao, WU Xi. Localizing disturbance source of power system forced oscillation caused by wind power fluctuation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):1-6.
- [12] Du W, Wang H, Xiao L Y. Power system small-signal stability as affected by grid-connected photovoltaic generation [J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(5): 688-703.
- [13] 熊连松, 刘小康, 卓放, 等. 光伏发电系统的小信号建模及其控制器参数的全局优化设计方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5):1234-1241.
- XIONG Liansong, LIU Xiaokang, ZHUO Fang, et al. Global optimization design of photovoltaic power generation system modeling and its controller parameters [J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1234-1241.
- [14] Shah R, Mithulananthan N, Lee K Y. Large-scale PV plant with a robust controller considering power oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 106-114.
- [15] 杜文娟, 王海风, 曹军. 多机电力系统中光伏电站附加稳定器的设计[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(4):5-13.
- DU Wenjuan, WANG Haifeng, CAO Jun. Design of a stabilizer attached to a grid-connected PV power plant in a multi-machine power system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(4): 5-13.
- [16] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究. 电网技术, 2006, 30(24):44-49.
- LONG Yuan, LI Guojie, CHEN Lin, et al. A study on damping power system oscillations base on photovoltaic system [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 44-49.
- [17] 周林, 任伟, 余希瑞. 大型光伏电站抑制低频振荡的有功阻尼控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11):2987-2995.
- ZHOU Lin, REN Wei, YU Xirui. Active damping control strategy in the large-scale photovoltaic plants restraining low-frequency oscillations[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2987-2995.
- [18] 马燕峰, 蒋云涛, 陈磊, 等. 光伏电站自抗扰附加阻尼控制抑制低频振荡策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1741-1747.
- MA Yanfeng, JIANG Yuntao, CHEN Lei, et al. An ADRC additional damping control strategy research on low frequency oscillation suppression of photovoltaic plants[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1741-1747.