

DOI: 10.7667/PSPC171622

# 离网条件下的虚拟同步机分布式并联系统暂态稳定分析

袁 敞<sup>1</sup>, 丁雨霏<sup>1</sup>, 冯佳耀<sup>1</sup>, 徐衍会<sup>1</sup>, 唐 酿<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 虚拟同步机技术的应用, 使得分布式电源具有同步发电机特性, 可实现离网运行, 其可控惯量对离网条件下分布式并联系统的频率稳定和有功振荡有很大的影响。基于离网条件下的虚拟同步机分布式并联系统, 以两端输出有功功率振荡为标准, 利用李雅普诺夫方法推导暂态能量函数, 分析两端惯性时间常数对系统有功振荡的影响。根据分析结果, 对暂态期间惯性时间常数进行控制, 抑制有功振荡幅度, 减小振荡时间, 从而提高系统暂态稳定性。最后, 利用 PSCAD/EMTDC® 软件建立模型进行仿真, 验证所提方法的可行性。

**关键词:** 离网运行; 虚拟同步发电机; 分布式并联; 大扰动; 有功振荡

## Transient stability analysis of virtual synchronous machine distributed parallel system under off-grid condition

YUAN Chang<sup>1</sup>, DING Yufei<sup>1</sup>, FENG Jiayao<sup>1</sup>, XU Yanhui<sup>1</sup>, TANG Niang<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Because of the application of virtual synchronous machine technology, the distributed generation has the characteristic of a synchronous generator, which can achieve off-grid operation. The controllable inertia has great influence on the frequency stability and active power oscillation of the distributed parallel system under the off-grid condition. In this paper, a distributed parallel system of virtual synchronous machine under off-grid condition is presented. The output active power oscillation at both ends are the standard. The Lyapunov method is used to analyze the influence of inertia time constant at both ends on the active power oscillation of the system. Then based on the analysis result, the inertial time constant is controlled to reduce active power oscillation range and time during the transient period, so as to improve the transient stability of the system. At last, a simulation model is established in PSCAD/EMTDC® to verify the feasibility of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677066).

**Key words:** off-grid operation; virtual synchronous generator; distributed parallel connection; large disturbance; active power oscillation

## 0 引言

近年来, 由于能源、环境、技术等因素, 新能源领域得到广泛的关注和发展<sup>[1-2]</sup>, 随之发展的微网技术是新能源接入的主要方式之一<sup>[3-7]</sup>。微网中采用传统控制方式的逆变器不具有惯性和阻尼, 限制了微网的运行方式<sup>[8]</sup>, 因而虚拟同步发电机控制方法(Virtual Synchronous Generator, VSG)受到了广泛的关注。随着 VSG 的应用, 以逆变器为基础的微网系统也具有

惯性, 具备一定的暂态响应能力, 使得逆变器具有同步机特性, 实现更多的运行方式<sup>[9-12]</sup>, 且由于其惯量可控性, 将对系统稳定性产生新的影响<sup>[13]</sup>。

目前针对单机系统惯性时间常数控制以改善频率稳定的讨论较为充分<sup>[9,14-17]</sup>。对于两机系统, 小扰动情况下利用小信号模型的分析较为充分, 并进行惯性时间常数暂态控制, 改善了暂态过程中的频率振荡幅度和时间<sup>[9,8-20]</sup>。而随着分布式电源容量增大, 运行方式多变, 针对大扰动下的暂态稳定性分析越发重要<sup>[21-22]</sup>。对于虚拟同步机系统, 由于其具有同步机特性, 因而分析方法可借鉴传统电网的分析方法, 同时需考

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677066)

虑其惯量可控性等特点<sup>[22]</sup>。适用于传统电网的暂态稳定分析方法主要有扩展等面积法(EAEC)、逐点法、能量积分准则法和李雅普诺夫方法,李雅普诺夫方法由于其实际价值,受到广泛关注和应用<sup>[23]</sup>。

文献[24-26]应用李雅普诺夫方法分析了惯性时间常数对传统电网暂态稳定性的影响,指出对于等值两机系统,并非惯量越大系统越稳定,但未考虑工况、参数、惯性时间常数对暂态期间功角变化的影响等因素,分析不够准确。文献[27]针对含可控惯量风电场的发电系统进行分析,认为送端惯性时间常数减小有利于系统稳定,但未考虑受端,且控制针对频率振荡,对有功振荡抑制效果并不理想。因此,对于大扰动下虚拟同步机可控惯量对分布式并联两机系统暂态稳定的影响及其控制的研究还需深入探讨。

综上所述,本文选择离网条件下的虚拟同步机分布式并联系统作为研究对象。作为一个惯量可控的两机系统,暂态稳定的基本分析方法采用传统电网中应用广泛的李雅普诺夫方法,构造暂态能量函数。以抑制两端有功振荡为目标,在联络线一端发生三相接地故障的情况下,分析暂态过程中两机系统送端、受端惯性时间常数对系统有功振荡的影响,并对送端进行控制,加快系统有功振荡恢复,减小振荡幅值。为验证理论分析的有效性,本文建立相应的虚拟同步机分布式并联系统模型,进行了动态仿真验证。

## 1 系统模型及 VSG 控制原理

### 1.1 虚拟同步机分布式并联系统模型

虚拟同步机分布式并联系统模型如图 1 所示。两虚拟同步机分别位于双回传输线的两端,负载接于传输线一端。传输线功率传输方向如图所示,因而将左端定义为送端,右端定义为受端。随着分布式电源容量逐渐增大,逐步具有独立运行作为负荷供电的能力,虚拟同步机可并网运行,也可离网运行。

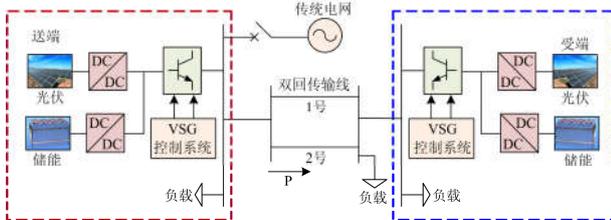


图 1 虚拟同步机分布式并联系统图

Fig. 1 Diagram of virtual synchronous machine distributed parallel system

系统具体结构及参数如图 2 所示。电力系统中典型的大扰动形式为接地故障,因而本文选取其中最严重的一种方式作为前提,即 2 号传输线一端发生三相接地故障,故障切除的同时切除故障线路。为简化分

析计算,两侧逆变器采用相同的结构和参数。

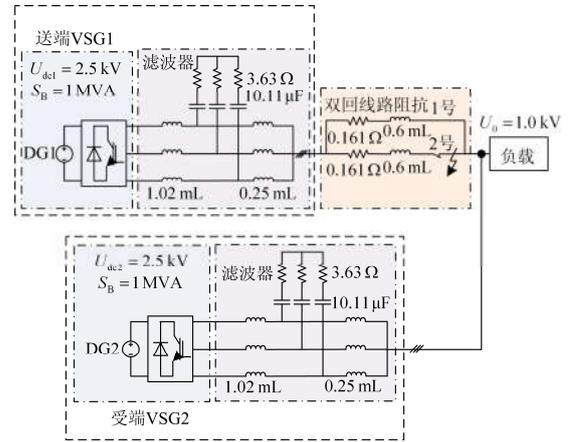


图 2 虚拟同步机分布式并联结构图

Fig. 2 Structure diagram of virtual synchronous machine distributed parallel system

### 1.2 VSG 控制原理简介

采用电压控制型虚拟同步机控制方法<sup>[2]</sup>,基本原理方程为

$$2H \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_{out} - D(\omega - \omega_{grid}) \quad (1)$$

$$P_m - P_{ref} = \frac{1}{m}(\omega_{ref} - \omega_{grid}) \quad (2)$$

$$E = E_0 + n(Q_{ref} - Q_{out}) \quad (3)$$

式(1)为模拟发电机转子机械方程,其中  $H$  为惯性时间常数,  $D$  为阻尼系数,  $\omega$  为机械角频率,  $\omega_{grid}$  为公共耦合点电压角频率,  $\omega_{ref}$  为参考角频率,  $P_m$  为机械功率,  $P_{out}$  为输出有功,  $P_{ref}$  为参考有功;式(2)为系统一次调频控制方程,  $m$  为有功-频率下垂系数;式(3)对应系统一次电压控制方程,  $n$  为无功-电压下垂系数。

根据 VSG 控制原理方程,可得采用 VSG 控制的逆变器基本结构及控制框图如图 3 所示。

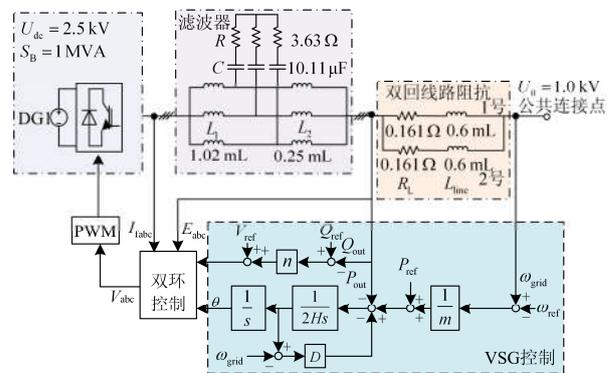


图 3 逆变器及 VSG 控制原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of inverter and VSG control

根据 VSG 原理对逆变器进行控制, 由 VSG 控制模块得到整个控制系统的变换角  $\theta$  和参考电压幅值  $E$ , 利用  $\theta$  和  $E$  生成双环控制的 abc 坐标系下的参考电压; 结合测量的三相电压、电流等值, 采用电压外环、电流内环控制方式进行双环控制; 最后经过双环控制后输出波形与三角波经 PWM 生成器得到逆变器 IGBT 控制开关信号, 实现逆变器控制。

## 2 惯性时间常数对系统有功振荡的影响

系统电路图如图 4 所示。

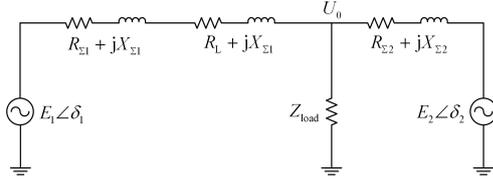


图 4 系统电路图

Fig. 4 Circuit diagram of system

图中,  $Z_i = R_{\Sigma i} + jX_{\Sigma i}$  为传输线两侧 VSG 到负荷节点处的等效阻抗,  $Z_L = R_L + jX_{L1}$  为线路阻抗,

$Z_{load} = \frac{U_0^2}{\sqrt{P_{load}^2 + Q_{load}^2}} (P_{load} + jQ_{load})$  为负载等值阻抗,

$\delta_i$  分别为两侧 VSG 的虚拟转子角,  $E_i$  为电动势,  $U_0$  为负载处电压。

对于等值两机系统, 两侧 VSG 的转子运动方程分别为

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = (P_{m1} - P_{E1}) / H_1 \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = (P_{m2} - P_{E2}) / H_2 \quad (5)$$

式中,  $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$  分别为两侧 VSG 输出功率;  $P_{E1}$ 、 $P_{E2}$  分别为两侧电磁功率;  $H_1$ 、 $H_2$  分别为两侧 VSG 惯性时间常数。

因  $\omega = \frac{d\delta}{dt}$ , 上式可以表示为

$$\frac{d\omega_1}{dt} = (P_{m1} - P_{E1}) / H_1 \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = (P_{m2} - P_{E2}) / H_2 \quad (7)$$

两端 VSG 输出电磁功率分别为<sup>[28]</sup>

$$P_{E1} = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 G_{12} \cos \delta_{12} + E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{12} \quad (8)$$

$$P_{E2} = E_2^2 G_{22} + E_1 E_2 G_{12} \cos \delta_{12} - E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{12} \quad (9)$$

其中暂态电抗后的电动势

$$E_i = \sqrt{\left( U_0 + \frac{P_{i0} R_{\Sigma i} + Q_{i0} X_{\Sigma i}}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{P_{i0} X_{\Sigma i} - Q_{i0} R_{\Sigma i}}{U_0} \right)^2} \quad (10)$$

两机系统转移阻抗为

$$\begin{cases} G_{ii} + jB_{ii} = \frac{Z_j + Z_{load}}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{load} + Z_2 Z_{load}}, i \neq j \\ G_{ij} + jB_{ij} = \frac{Z_{load}}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{load} + Z_2 Z_{load}} \end{cases} \quad (11)$$

初始稳态情况下, 两端机械功率分别等于电磁功率

$$P_{m1} = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 G_{12} \cos \delta_{120} + E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{120} \quad (12)$$

$$P_{m2} = E_2^2 G_{22} + E_1 E_2 G_{12} \cos \delta_{120} - E_1 E_2 B_{12} \sin \delta_{120} \quad (13)$$

联立式(6)一式(13), 忽略阻尼, 可得

$$\frac{d\Delta\omega_1}{dt} = \frac{E_1' E_2' B_{12}}{H_1} (\sin \delta_0 - \sin \delta_{12}) \quad (14)$$

$$\frac{d\Delta\omega_2}{dt} = \frac{E_1' E_2' B_{12}}{H_1} (-\sin \delta_0 + \sin \delta_{12}) \quad (15)$$

令式(14)与式(15)相减, 得

$$H \frac{d\Delta\omega_{12}}{dt} = a (\sin \delta_0 - \sin \delta_{12}) \quad (16)$$

式中:  $a = E_1' E_2' B_{12}$ ;  $H = \frac{H_1 H_2}{(H_1 + H_2)}$ 。

将式(16)两端同乘  $\Delta\omega_{12}$  并积分, 得暂态能量

$$E_t = E_k + E_p = \frac{1}{2} H \Delta\omega_{12}^2 - a \int_{\delta_0}^{\delta_{12}} (\sin \delta_0 - \sin \delta_{12}) d\delta_{12} \quad (17)$$

为保证暂态过程中系统保持稳定, 暂态能量  $E_t$  应保持衰减, 以送端惯性时间常数  $H_1$  为变量时, 假定受端  $H_2$  不变, 可得

$$\frac{dE_t}{dt} = \frac{H_2^2 \Delta\omega_{12}^2}{2(H_1 + H_2)^2} \cdot \frac{dH_1}{dt} < 0 \quad (18)$$

而以受端惯性时间常数  $H_2$  为变量时, 假定送端  $H_1$  保持不变, 可得

$$\frac{dE_t}{dt} = \frac{H_1^2 \Delta\omega_{12}^2}{2(H_1 + H_2)^2} \cdot \frac{dH_2}{dt} < 0 \quad (19)$$

根据式(18)、式(19)可知, 为保证暂态能量  $E_t$  衰减, 应使  $H_1$  或  $H_2$  在暂态过程中保持衰减, 为保证系统惯量支撑, 暂态过程中只控制  $H_1$  衰减,  $H_2$  保持不变。

对式(19)积分, 可得暂态过程中, 暂态能量变化量为

$$\Delta E = \frac{H_2^2}{2} \int_0^{\Delta t} \frac{\sin^2 \left( \sqrt{\frac{134.15}{H_1} + \frac{134.15}{H_2}} \cdot t \right)}{(H_1 + H_2)^2} dH_1 \quad (20)$$

根据式(20)可以看出, 在保持  $H_2$  不变的前提下, 暂态能量变化量  $\Delta E$  受  $H_1$  衰减形式影响, 暂态

过程中  $H_1$  不同的衰减形式会影响能量衰减量  $\Delta E$ 。

### 3 惯性时间常数对能量函数衰减变化的影响

根据式(20)可知, 暂态过程中  $H_1$  不同的衰减形式会影响  $\Delta E$  的衰减量, 因而针对  $H_1$ , 选取三种典型的衰减形式进行对比分析, 并在此基础上对暂态过程中的  $H_1$  进行控制, 以抑制系统有功振荡。

(1)  $H_1$  采用一次函数衰减形式, 即  $H_1 = b - at$ , 分析斜率  $a$  和衰减时间对暂态能量函数衰减的影响。

令  $b = 4$ ,  $a$  分别取 1.5、3、30, 得  $\Delta E$  随时间  $t$  的变化如图 5 所示。

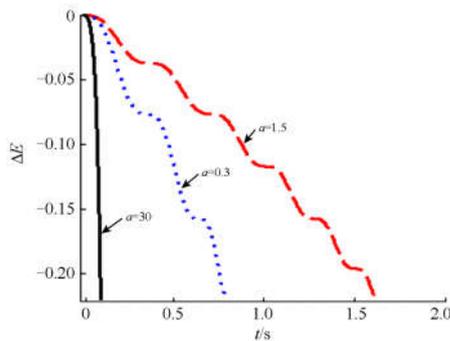


图 5 斜率对  $\Delta E$  变化的影响  
Fig. 5 Influence of slope on  $\Delta E$

根据图 5 结果可知, 斜率  $a$  越大, 相同时间内  $\Delta E$  的值下降得越多,  $\Delta E$  衰减越快, 有功振荡恢复也就越快。

(2) 令  $b = 4$ ,  $a = 3$ , 得不同衰减时间即终值不同时,  $\Delta E$  随时间  $t$  的变化如图 6 所示。

根据图 6 可知, 当  $H_1$  采用相同的衰减方式时, 暂态期间衰减持续时间越长,  $\Delta E$  下降的量越多, 有功振荡恢复效果越好。

(3) 如图 7, 当  $a$  取负, 即  $H_1$  在暂态期间保持递增时,  $\Delta E$  为正, 系统暂态能量递增, 不利于有功振荡的快速恢复。

(4)  $H_1$  采用不同的衰减形式对比分析

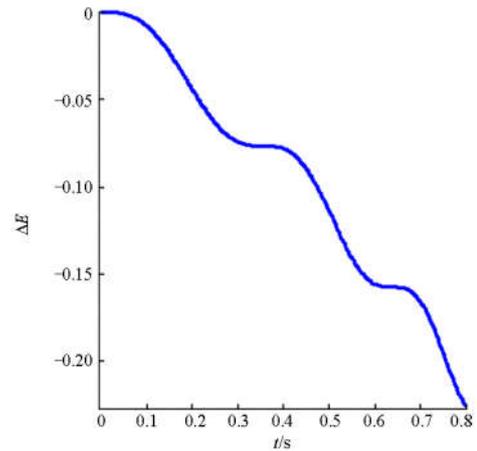
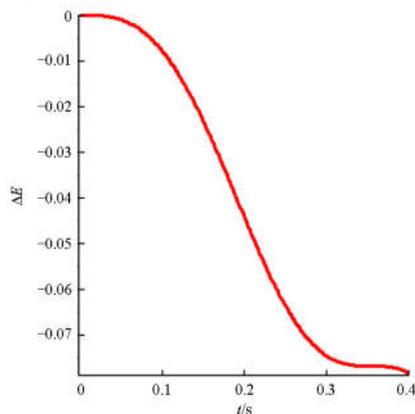


图 6 终值对  $\Delta E$  变化的影响  
Fig. 6 Influence of final value on  $\Delta E$

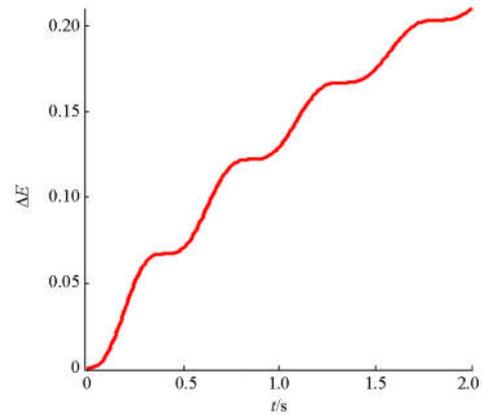


图 7 斜率取负数对  $\Delta E$  的影响  
Fig. 7 Effect of negative slope on  $\Delta E$

$H_1$  分别采用一次函数、指数函数、二次函数的衰减形式, 在相同的时间内, 衰减到相同的终值,  $\Delta E$  随  $t$  变化图如图 8 所示。

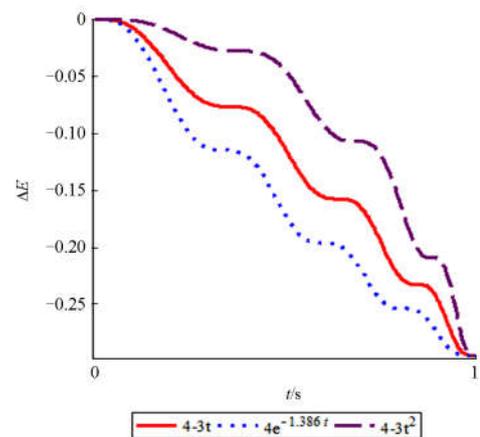


图 8 不同衰减形式对  $\Delta E$  的影响  
Fig. 8 Effect of different attenuation forms on  $\Delta E$

根据图 8 可知,  $H_1$  选用不同的衰减形式, 在相同时间内,  $\Delta E$  衰减量相同, 但衰减快慢不同,  $\Delta E$  衰减越快, 有功振荡恢复速度越快。

(5) 根据以上分析, 相同时间内,  $H_1$  衰减越陡,  $\Delta E$  衰减越快, 系统有功振荡恢复越快, 当  $H_1$  衰减斜率取极限时, 即  $H_1$  在暂态开始瞬间突降时, 有功振荡恢复效果最好。

#### 4 仿真验证

为分析暂态期间分布式并联两机系统两端惯性时间常数对系统有功振荡的影响, 本文采用 PSCAD 仿真软件搭建了仿真模型, 对以上理论分析结论进行了验证。系统包含两台储能逆变器, 逆变器均采用相同的 VSG 控制方式, 为简化分析, 两端逆变器均采用相同的参数, 两逆变器容量分别取 1 MVA, 系统具体参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

| 参数    | 数值             | 参数             | 数值            |
|-------|----------------|----------------|---------------|
| $S_B$ | 1 MVA          | $P_{ref1}$     | 0.7 MW        |
| $U_0$ | 1 kV           | $P_{ref2}$     | 0.3 MW        |
| $L_1$ | 1.02 mH        | $U_{dc}$       | 2.5 kV        |
| $L_2$ | 0.25 $\Omega$  | $\omega_{ref}$ | 314 rad/s     |
| $R$   | 3.63 $\Omega$  | $C$            | 10.11 $\mu F$ |
| $R_L$ | 0.161 $\Omega$ | $L_{line}$     | 0.6 mH        |

表中,  $P_{ref1}$ 、 $P_{ref2}$  为 VSG 控制输入参考功率, 各参数含义如图 3 中所示。仿真系统在 5 s 时, 一回线路的末端发生三相接地故障, 故障持续 0.1 s 后, 在 5.1 s 切除故障, 同时切除故障线路。系统两端初始惯性时间常数分别为 4, 暂态期间保持受端  $H_2 = 4$  不变, 改变送端惯性时间常数  $H_1$ , 对比分析不同的  $H_1$  衰减形式对系统有功振荡的影响, 从而根据分析结果对暂态期间系统惯性时间常数进行控制, 改善暂态期间有功振荡效果。具体仿真结果如下。

(1) 暂态期间  $H_1$  采用一次函数衰减的仿真分析

$H_1 = b - at$ , 令初值  $b = 4$ ,  $a$  分别取 1.5、3、30, 如图 9 所示, 分析斜率即衰减快慢对系统有功振荡的影响。

根据图 10 所示仿真结果可知, 随着  $H_1$  斜率  $a$  的增大,  $H_1$  衰减变陡; 对比  $a = 0$ , 即暂态期间  $H_1$  保持不变的情况, 送端有功振荡曲线观察点处幅值为 0.6 MW, 相较于稳定情况出力 0.7 MW, 降低了  $\Delta P = 0.1$  MW, 将有功功率曲线无波动视为达到稳定, 则系统有功振荡持续时间  $\Delta t = 2.3$  s; 当  $a$  取 1.5 时, 送端有功振荡曲线观察点处振荡幅值降到  $\Delta P = 0.08$  MW, 有功振荡持续时间  $\Delta t = 1.7$  s; 当  $a$

继续增大到 3 时, 有功振荡曲线观察点处幅值降到  $\Delta P = 0.03$  MW, 有功振荡持续时间缩短到  $\Delta t = 1.3$  s; 若  $a$  增大到 30, 则观察点处有功幅值降低为  $\Delta P = 0.01$  MW, 即在观察点处系统已达到稳定, 有功振荡持续时间缩短到  $\Delta t = 1.0$  s。图 10(b) 所示的受端有功功率振荡情况有着相同的规律, 即  $a$  越大, 有功振荡幅值越小, 稳定越快。

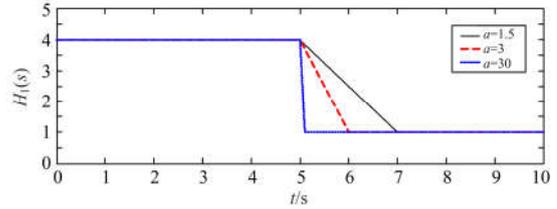
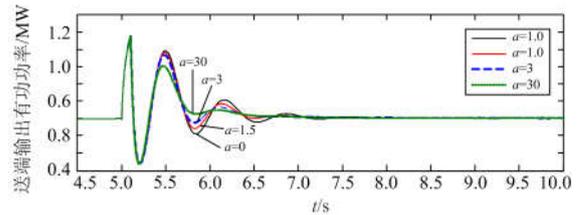
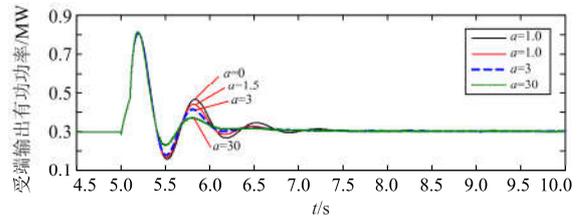


图 9  $H_1$  衰减形式

Fig. 9 Attenuation form of  $H_1$



(a) 送端输出功率随仿真时间变化图



(b) 受端输出功率随仿真时间变化图

图 10 两端输出有功随仿真时间变化图

Fig. 10 Output active power in both ends

(2)  $H_1 = 4 - 3t$ , 并保持  $b = 4$ ,  $a = 3$  不变, 分析在此前提下衰减时间  $t$  即  $H_1$  终值对系统暂态稳定的影响。  $H_1$  衰减情况如图 11 所示。

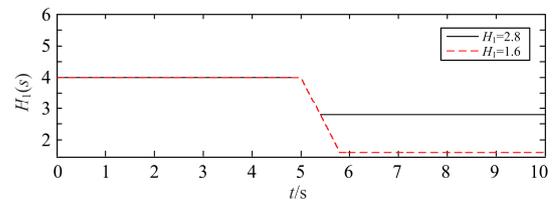
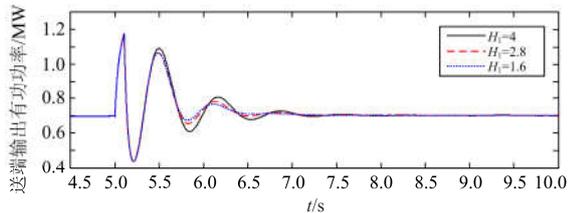


图 11  $H_1$  衰减形式

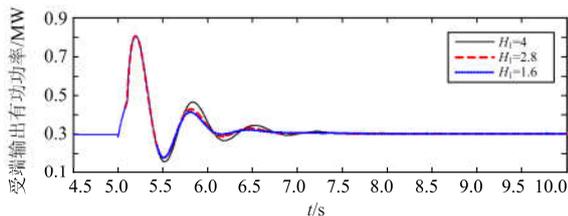
Fig. 11 Attenuation form of  $H_1$

根据图 12 所示仿真结果可知,  $H_1$  保持衰减的时间  $t$  对系统有功振荡也是有影响的。  $H_1$  的衰减形

式不变, 暂态能量变化量  $\Delta E$  的衰减快慢相同, 但持续时间越长,  $\Delta E$  衰减的量越多, 系统积聚暂态能量变化量减少越多, 则越有利于有功振荡的快速恢复, 如图 12(a)所示, 当  $t=0.4$ , 即  $H_1$  终值为 2.8 时, 系统有功在观察点处振荡幅值为  $\Delta P=0.05$  MW, 系统振荡持续时间  $\Delta t=1.7$  s; 当  $t=0.8$ , 即  $H_1$  终值为 1.6 时, 系统有功在观察点处振荡幅值为  $\Delta P=0.02$  MW, 系统有功振荡持续时间降为  $\Delta t=1.4$  s。



(a) 送端输出功率随仿真时间变化图



(b) 受端输出功率随仿真时间变化图

图 12 两端输出有功随仿真时间变化图

Fig. 12 Output active power in both ends

由此可见, 若  $H_1$  衰减时间持续较长, 终值越低, 系统有功振荡恢复效果越好。

(3) 令  $b=4$  保持不变, 暂态过程中令  $a=-3$ , 即  $H_1$  递增,  $H_1$  随时间变化如图 13 所示, 仿真结果如图 14 所示。

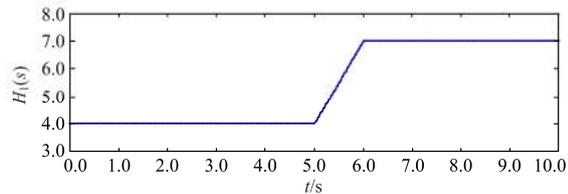
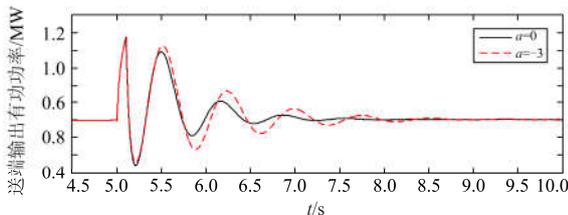
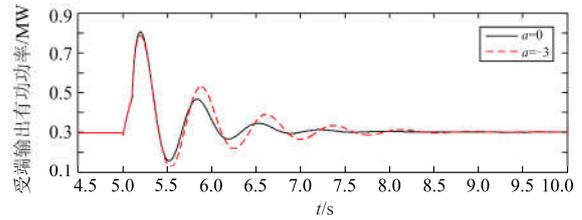


图 13  $H_1$  衰减形式

Fig. 13 Attenuation form of  $H_1$



(a) 送端输出功率随仿真时间变化图



(b) 受端输出功率随仿真时间变化图

图 14 两端输出有功随时间  $t$  的变化图

Fig. 14 Output active power in both ends

根据图 14 所示的仿真结果可知, 当  $a=-3$ , 即  $H_1$  保持递增时, 系统两端输出有功功率振荡幅值明显增大, 振荡持续时间由 2.3 s 增加到 3.4 s, 因而暂态期间  $H_1$  递增不利于有功振荡的恢复。

(4)  $H_1$  始末值相同, 衰减形式不同。取三种不同的衰减形式进行对比, 分析  $H_1$  不同的衰减形式对系统有功振荡的影响。  $H_1$  随时间  $t$  的衰减形式如图 15 所示。

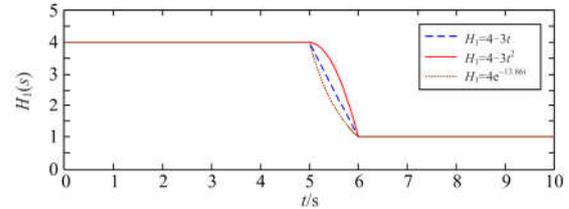
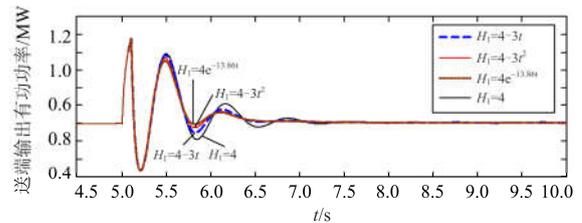


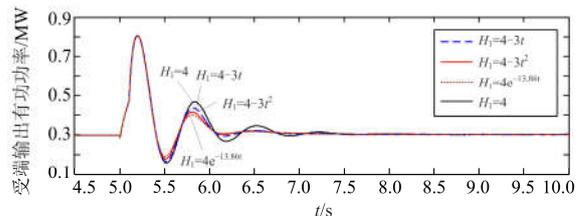
图 15  $H_1$  衰减形式

Fig. 15 Attenuation form of  $H_1$

根据图 16 的仿真结果可知, 三种衰减函数有功振荡达稳定的时间几乎相同, 但指数函数衰减形式的振荡幅值更小, 因而更利于系统有功振荡的恢复。



(a) 送端输出功率随仿真时间变化图



(b) 受端输出功率随仿真时间变化图

图 16 两端输出有功随仿真时间变化图

Fig. 16 Output active power in both ends

(5) 根据以上分析可知, 暂态期间  $H_1$  保持衰减有利于抑制系统有功振荡, 且  $H_1$  衰减越陡, 系统有功振荡恢复越快, 当  $H_1$  衰减斜率取极限时, 即暂态瞬间  $H_1$  突降如图 17 所示, 系统有功振荡恢复效果应最好, 仿真验证该情况下的系统有功振荡情况, 结果如图 18 所示。

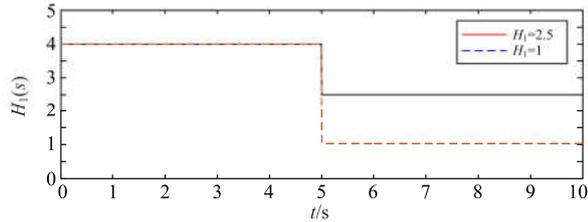
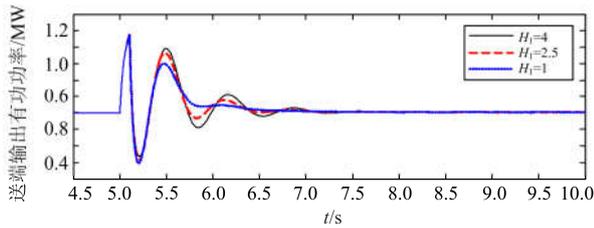


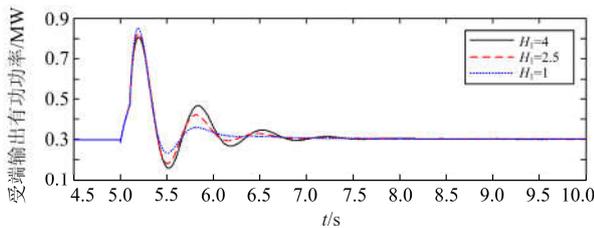
图 17  $H_1$  衰减形式

Fig. 17 Attenuation form of  $H_1$

根据图 18 所示的仿真结果可知, 当  $H_1$  在暂态瞬间突降时至 1.0 时, 观察点处有功振荡幅度  $\Delta P$  接近 0, 且  $\Delta t = 0.7$  s, 即 5.7 s 时系统就可以恢复稳定。对比图 10、图 15 所示结果, 在  $H_1$  初值、终值相同的情况下, 暂态瞬间  $H_1$  突降, 暂态有功恢复效果最好。



(a) 送端输出功率随仿真时间变化图



(b) 受端输出功率随仿真时间变化图

图 18 两端输出有功随仿真时间变化图

Fig. 18 Output active power in both ends

图 19 和图 20 所示为送端  $H_1$  在暂态瞬间突降的情况下暂态期间(5.12~6.3 s)的送端电压电流波形图及 5.4~5.5 s 之间的细节图。由图 19 可知, 因采用电压型 VSG 控制的逆变器, 暂态期间电压波形不受  $H_1$  变化的影响; 由图 20 可知, 通过控制暂态期间  $H_1$  突降到较低值, 可以减小电流波动时间, 且通过对应的细节图可以看出波动幅度得到有效抑制。受端电压、电流变化规律同理, 如图 21 和图 22 所示。

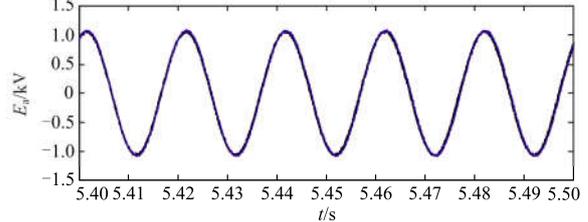
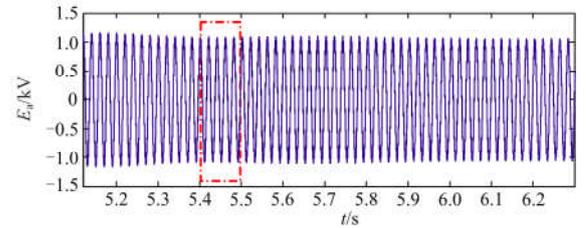


图 19 送端电压波形图

Fig. 19 Waveform of terminal voltage in sending-end

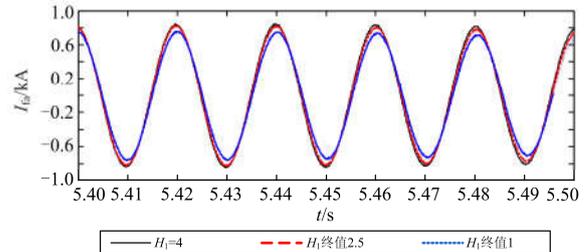
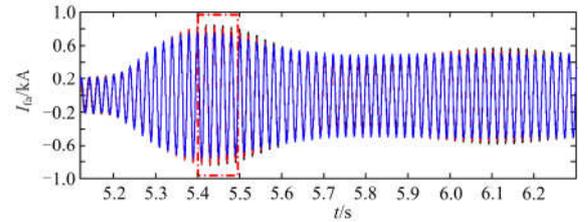


图 20 送端电流波形图

Fig. 20 Waveform of terminal electric current in sending-end

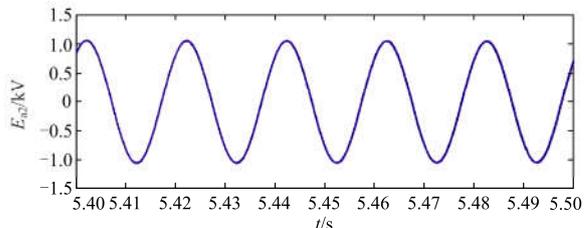
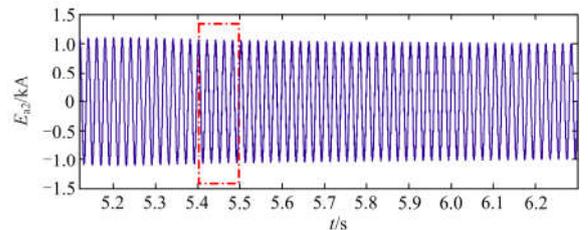


图 21 受端电压波形图

Fig. 21 Detail diagram of voltage waveform in receiving -end

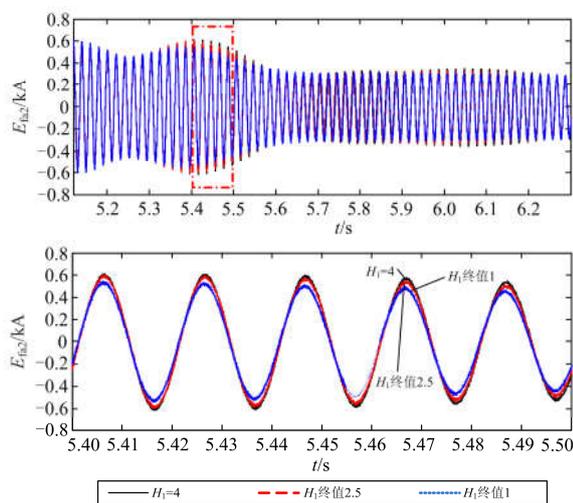


图 22 受端电流波形图

Fig. 22 Waveform of terminal electric current in receiving-end

综上, 对于虚拟同步机分布式并联系统, 暂态期间  $H_1$  衰减可使有功更快地恢复稳定, 相较于其他衰减形式,  $H_1$  突降到较低值时, 系统两端有功振荡幅值最小, 振荡持续时间最短, 有功恢复效果最好。

## 5 结论

本文以离网条件下的虚拟同步机分布式并联系统为研究对象, 分析了在某一回传输线末端发生三相接地故障的大扰动情况下, 送端、受端两侧惯性时间常数对系统有功振荡的影响, 并对暂态期间送端惯性时间常数进行控制, 有效地减小有功振荡时间和幅度, 从而提升了系统暂态稳定性。本文研究结论具体包括:

(1) 对于离网条件下的虚拟同步机分布式并联系统, 在传输线某一回路末端发生三相接地故障的大扰动情况下, 送端或受端惯性时间常数减小有利于抑制有功振荡幅度, 减小有功振荡恢复时间。

(2) 对于送端惯性时间常数, 不同的衰减方式效果不同, 当衰减幅度相同时, 送端惯性时间常数衰减用时越短, 即衰减形式越陡, 有功振荡恢复速度越快。相较于其他衰减形式, 若暂态开始时, 控制送端惯性时间常数直接突降到较低值, 有功振荡幅值最小, 恢复稳定速度最快。

## 参考文献

[1] 苏咏梅, 王振宇, 易善明. 不同风力发电机组同时并网稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 101-107.  
SU Yongmei, WANG Zhenyu, YI Shanming. Stability analysis for wind power integration with different WTGS[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 101-107.

[2] 张兴, 朱德斌, 徐海珍. 分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J]. 电源学报, 2012, 10(3): 1-6.

ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(3): 1-6.

[3] LASSETER R H, ETO J H, SCHENKMAN B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 325-332.

[4] 麻常辉, 潘志远, 刘超男, 等. 基于自适应下垂控制的风光储微网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 21-27.

MA Changhui, PAN Zhiyuan, LIU Chaonan, et al. Frequency regulation research of wind-PV-ES hybrid micro-grid system based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 21-27.

[5] 陈汝昌, 陈飞, 张帆, 等. 新能源电网中微电源并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 55-60.

CHEN Ruchang, CHEN Fei, ZHANG Fan, et al. Control strategies for grid-connected microsource in new energy power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 55-60.

[6] 李江, 张永利, 刘强, 等. 分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 1-8.

LI Jiang, ZHANG Yongli, LIU Qiang, et al. Research on grid-connected control strategy of distributed PV-storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 1-8.

[7] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

[8] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.  
MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.

[9] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.

[10] SONI N, DOOLLA S, CHANDORKAR M C. Inertia design methods for islanded microgrids having static and rotating energy sources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 5165-5174.

[11] HIRASE Y, SUGIMOTO K, SAKIMOTO K, et al. Analysis of resonance in microgrids and effects of system frequency stabilization using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1287-1298.

[12] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变

- 换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.
- ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [13] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-360.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [14] LI Dongdong, ZHU Qianwei, LIN Shunfu, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 397-398.
- [15] LIU J, MIURA Y, ISE T. Dynamic characteristics and stability comparisons between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[C] // IPEC, The 2014 International Power Electronics Conference, May 18-21, 2014, Japan, Hiroshima: 1536-1543.
- [16] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.
- CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [17] 张亚楠, 朱淼, 张建文, 等. 基于自适应调节的微源逆变器虚拟同步发电机控制策略[J]. 电源学报, 2016, 14(3): 11-19.
- ZHANG Yanan, ZHU Miao, ZHANG Jianwen, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting for distributed inverters[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(3): 11-19.
- [18] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Stability assessment and optimization methods for microgrid with multiple VSG units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(2): 1462-1471.
- [19] XI Xinze, GENG Hua, YANG Geng. Small signal stability of weak power system integrated with inertia tuned large scale wind farm[C] // 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, May 20-23, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia: 514-518.
- [20] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 提高光储柴独立微网频率稳定性的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 77-85.
- SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator for improving frequency stability of islanded photovoltaic-battery-diesel microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 77-85.
- [21] KABALAN M, SINGH P, NIEBUR D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2287-2295.
- [22] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
- ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [23] GERD A LUYDERS. Transient stability of multimachine power systems via the direct method of Lyapunov[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(1): 23-36.
- [24] 寇凌岳, 艾欣. 惯性时间常数对互联系统暂态稳定性影响的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 42-47.
- KOU Lingyue, AI Xin. Simulation study of system inertia on power system transient stability[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 42-47.
- [25] 高洵, 吴涛. 电网交流互联对电网暂态稳定性的影响[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 21-26.
- GAO Xun, WU Tao. Influence of AC network interconnection on power system transient stability[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 21-26.
- [26] 赵振元, 陈维荣, 戴朝华, 等. 系统惯性时间常数对互联电网暂态稳定水平的影响[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 102-107.
- ZHAO Zhenyuan, CHEN Weirong, DAI Chaohua, et al. Influence of system inertia time constants on transient stability level of interconnected AC power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 102-107.
- [27] 张祥宇, 陈玉伟, 付媛, 等. 含可控惯量风电场的发电系统功率振荡特性分析与综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4564-4572.
- ZHANG Xiangyu, CHEN Yuwei, FU Yuan, et al. Oscillation characteristic of power generation system with controlled inertia wind farm and integrated control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4564-4572.
- [28] 常鲜戎. 电力系统暂态过程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2018-02-08

作者简介:

袁 敞(1981—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为新能源电网、电力电子技术在电力系统中的应用;

E-mail: yc\_ncepu@163.com

丁雨霏(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源、电力系统分析与控制等; E-mail: yufei5101211@163.com

冯佳耀(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电网、电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: 237040860@qq.com

(编辑 姜新丽)