

虚拟同步发电机参数整定及优化控制策略研究

虚拟同步发电机（VSG）因能控制并网逆变器模拟同步发电机运行特征，受到新能源发电领域的广泛关注。VSG的稳定性和运行性能与其参数密切相关，转动惯量和阻尼系数等参数设计尤为重要。在现有研究的基础上，定量分析了VSG参数对系统运行性能的影响，并给出VSG参数设计方法。然后对现有的VSG控制策略进行优化，提出一种新型的转动惯量和阻尼系数协调变化的控制策略。最后搭建仿真模型，验证参数分析设计及所提控制策略的有效性。

陈俊马 王 冰 张德望/河海大学能源与电气学院

0 引言

随着化石能源的逐渐枯竭以及环境污染的日益加重，传统以火电为主的能源结构已难以满足能源可持续发展的需求。面向新能源的分布式发电技术是现阶段解决能源、环境问题的有效途径之一^[1-3]。近年来，风能、太阳能等新能源受到越来越多的关注，分布式发电技术也取得了快速的发展。其中，光伏发电作为新能源发电的重要组成部分，发挥着越来越重要的作用^[4-6]。

分布式光伏电源主要通过电力电子逆变器接入电网。与传统同步发电机相比，并网逆变器控制灵活，响应迅速，但其电气及物理结构相对分散，难以进行集中的调度，同时缺少惯性和阻尼，无法在电网受到扰动时抑制功率和频率的波动^[7-8]。为此，研究者提出虚拟同步发电机（Virtual Synchronous Generator, VSG）的概念，受到国内外的广泛关注^[9-11]。VSG技术通过控制并网逆变器模拟同步

发电机的运行特征，使分布式光伏电源除了向电网提供电能之外，还能够像同步发电机一样，为电网提供一定的频率和电压支撑，保障了电网的稳定运行。VSG所具备的特征也正是未来电网对分布式光伏电源接入的重要需求。因此，VSG越来越广泛地应用于微电网或主动配电网中，是解决大规模分布式光伏电源并网的有效手段之一。

目前，已有较多文献对VSG运行控制策略进行了研究。文献[12]针对单相微电网提出了一种VSG并/离网无缝切换控制策略。为消除VSG有功和无功控制之间的耦合关系，文献[13-14]提出了一种VSG参数解耦设计方法。针对电网故障时的频率控制问题，文献[15]设计了级联的频率、相角和直流电压环控制策略，使VSG在故障时可为电网提供频率支撑，实现频率的快速恢复。文献[16]在保证系统惯性、阻尼效果不变的情况下，以VSG直流端储能有功出力最小为优化目标进行优化控制，减小了VSG有功控制的成本。针对VSG参数动态可调的特点，文献[17-18]提出了通过自适应调节转动惯量，消除扰动导致的功率和频率振荡的方法，但是该文并未考虑在调节过程中功率的超调量，虽然实现了快速稳定，但功率超调较大。

VSG的稳定性和运行性能与其参数密切相关，转动惯量和阻尼系数等参数设计尤为重要。现有研究忽略了对惯性和阻尼等参数支撑效果的综合分析，缺少系统的参数设计方法。本文定量地分



陈俊马/硕士研究生

关键词/Keywords

虚拟同步发电机 ·
参数整定 ·
惯量和阻尼 ·
协调 ·
优化 ·

国家自然科学基金（51777058）。

析了VSG参数对系统运行性能的影响,并给出VSG参数整定设计方法。然后对现有的VSG控制策略进行优化,提出一种新型的转动惯量和阻尼系数协调变化的控制策略。最后通过搭建仿真模型,验证参数分析设计及所提控制策略的有效性。

1 VSG的基本原理

本文研究的虚拟同步机采用同步发电机的典型二阶模型。该模型采用同步发电机的机电暂态数学模型,有效模拟同步发电机的转子机械特性和定子电气特性。

$$\begin{cases} J \frac{d\Delta\omega}{dt} = T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{\omega_m} - \frac{P_e}{\omega_m} - D\Delta\omega \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \\ \dot{E}_{0i} = \dot{U}_i + \dot{I}_i(R + jX) \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_m 和 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩; P_m 和 P_e 分别为机械功率和电磁功率; D 为阻尼系数; J 为虚拟惯量; $\Delta\omega$ 为电角速度差, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$, ω 和 ω_0 分别为实际电角速度和额定电角速度,如果令极对数为1,则机械角速度 $\omega_m = \omega$; δ 为电角度; $\dot{E}_{0i}$ 、 $\dot{U}_i$ 和 $\dot{I}_i$ 分别为*i*相感应电动势、定子端电压和定子电流; R 和 X 分别为定子电枢电阻和同步电抗。

1.1 有功-频率控制

当光伏并网发电系统接入大电网时,系统的输出端电压和频率跟随大电网变动,因此只需向电网输送功率。当光伏并网发电系统工作在分布式电源渗透率较高的弱网环境中时,需要光伏并网发电系统参与电网频率的调节,能够在系统负荷变化的情况下给电网频率提供一定的支撑。结合VSG本体模型和同步发电机调速器模型构成调频控制器,即

$$P_m - P_{\text{ref}} = K_\omega(\omega_0 - \omega_g) \quad (2)$$

式中, P_{ref} 为VSG有功给定输入; K_ω 为调差系数; ω_g 为电网角速度。

由于VSG工作在参考转速点附近,不考虑转速变化对阻尼绕组的影响,则有 $\omega_m \approx \omega_0$ 。

将式(2)代入式(1)中,可得

$$P_{\text{ref}} - P_e = \omega_0[(K + Js)\Delta\omega] + K_\omega(\omega_g - \omega) \quad (3)$$

式中, $K = D + K_\omega/\omega_0$ 。

有功-频率控制框图如图1所示。

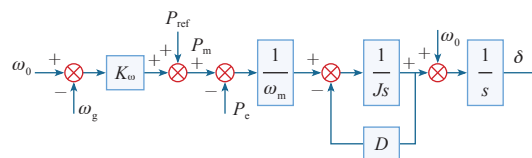


图1 有功-频率控制框图

1.2 无功-电压控制

VSG的无功电压调节控制中,先由发电机的电压调节单元根据无功变化和下垂系数计算出机端输出电压参考值,供给发电机励磁绕组,VSG机端输出电压的参考值计算如下

$$U_{\text{ref}} - U_N = K_v(Q_{\text{ref}} - Q_e) \quad (4)$$

式中, U_{ref} 为机端输出电压幅值的参考值; U_N 为发电机空载电压参考值,即电网电压额定值; K_v 为电压无功下垂系数; Q_{ref} 为无功给定; Q_e 为系统输出的无功功率。

无功电压控制器框图如图2所示。

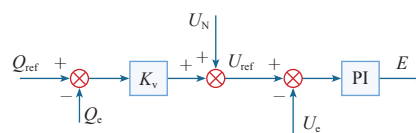


图2 无功-电压控制框图

为了保证电压幅值能够准确地跟随到给定值,加入了PI控制器。根据图2可以得到VSG定子内电动势*E*为

$$E = [(Q_{\text{ref}} - Q_e)K_v + U_N - U_c] \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (5)$$

在无功电压控制器中,比例系数 K_p 的取值很大程度上影响着系统的动态特性,为了降低无功环路对有功环路的影响,通常取 $K_p = 0$;对于 K_i 的取值,则需在尽可能减小系统动态特性干扰的情况下取较大值。

2 VSG参数分析及设计

VSG控制在传统下垂控制的基础上加入转子运动方程来模拟转子惯性和阻尼特性,简言之,

VSG控制是具有转子惯性的下垂控制。VSG控制中的转动惯量 J 、阻尼系数 D 和同步电抗 X 等参量使频率不再突变,有利于提高频率稳定性。与传统同步发电机不同,VSG的参数不受硬件条件限制,可根据需要灵活设置。

2.1 VSG对系统支撑作用分析

由于系统输出阻抗为感性, X 远大于 R ,同时考虑到功角一般很小, $\sin \delta = \delta$, $\cos \delta = 1$,因此VSG有功功率的计算可以简化为

$$P = \frac{3EU}{X} \delta \quad (6)$$

并网时,VSG角频率等于电网角频率,根据图1和前文所述可得有功功率开环传递函数和闭环传递函数分别为

$$G_{op}(s) = \frac{\frac{3EU}{X}}{s(Js + K)\omega_0} \quad (7)$$

$$G_{cp}(s) = \frac{\frac{3EU}{J\omega_0 X}}{s^2 + \frac{K}{J}s + \frac{3EU}{J\omega_0 X}} \quad (8)$$

二阶模型的自然振荡角频率 ω_n 和阻尼比 ζ 分别为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{3EU}{J\omega_0 X}} \\ \zeta = \frac{K}{2J} \sqrt{\frac{J\omega_0 X}{3EU}} \end{cases} \quad (9)$$

由上面的分析可知,有功功率环路是一个典型的I型系统,单位阶跃响应下不存在稳态误差,即稳定后系统无功输出 P_e 能够实现对 P_{ref} 的无静差跟踪。

式(8)的特征方程为

$$J\omega_0 X s^2 + K\omega_0 X s + 3EU = 0 \quad (10)$$

$K=0$ 时,特征方程变成根轨迹方程形式如下

$$1 + \frac{J\omega_0 X}{3EU} s^2 = 0 \quad (11)$$

因此, $K=0$ 时,以 J 为开环增益的等效开环传递函数为

$$G_{op1}(s) = \frac{J\omega_0 X s^2}{3EU} \quad (12)$$

式(12)所示的开环传递函数随着 J 从零到无穷大变化时的根轨迹如图3所示。

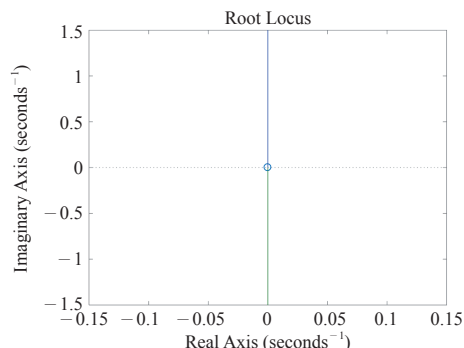


图3 $K=0$, J 变化时的根轨迹

对于特定的 J ,以 K 为开环增益的等效开环传递函数为

$$G_{op2}(s) = \frac{K\omega_0 X s}{J\omega_0 X s^2 + 3EU} \quad (13)$$

J 取不同值时,式(13)所示的开环传递函数随着 K 从零到无穷大变化时的根轨迹如图4所示。

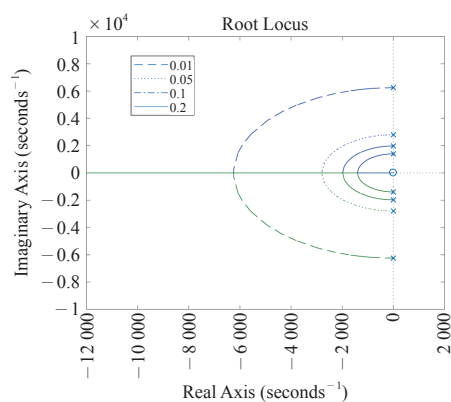


图4 J 取不同值时 K 变化时的根轨迹

从图3和图4可以看出:

- 1) $K=0$ 时,根轨迹都在虚轴上,表示如果没有阻尼,系统将无法保持稳定。
- 2) 转动惯量 J 越大,根轨迹离原点越近,超调量增大,调节时间变长,动态性能变差,说明 J 的取值不宜过大。
- 3) J 固定时,在 K 从零到无穷大变化的过程中,系统的根轨迹有两条分支,在实轴上存在一个分离点。分离点前,系统存在一对共轭复根,为欠阻尼系统;分离点后,系统存在两个互异实根,为过阻尼系统。

考虑二阶欠阻尼系统, $0 < \zeta < 1$, 若选取误差带 $\Delta = 0.02$, 则对应的超调量 $\sigma\%$ 和调节时间 t_s 分别为

$$\begin{cases} \sigma\% = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\% \\ t_s = \frac{4.4}{\zeta\omega_n} \end{cases} \quad (14)$$

由式 (9)、式 (14) 可知, 当 K 固定时, J 越大, ζ 越小, $\sigma\%$ 越大, t_s 越长; 而当 J 固定时, K 越大, ζ 越大, $\sigma\%$ 越小, t_s 越短, 但系统响应速度会更缓慢。

2.2 VSG参数设计

由式 (7) 可知, 有功功率环路的开环传递函数由比例增益 $3EU/(K\omega_0 X)$ 、积分环节 $1/s$ 和一阶惯性环节 $1/[(J/K)s + 1]$ 组成, 其中 K 决定有功功率环路的开环增益, 而 J 和 K 共同决定一阶惯性环节的截止频率。设有功功率环路的穿越频率为 f_{pc} , 则有

$$|G_{op}(j\omega_{pc})| = \left| \frac{3EU}{K\omega_0 X} \times \frac{1}{(J/D)j\omega_{pc} + 1} \times \frac{1}{j\omega_{pc}} \right| = 1 \quad (15)$$

通过求解式 (15), 可以得到转动惯量 J 的表达式如下

$$J = \sqrt{\frac{9E^2 U^2 - \omega_{pc}^2 K^2 \omega_0^2 X^2}{\omega_{pc}^4 \omega_0^2 X^2}} \quad (16)$$

根据物理意义必定有 $J \geq 0$, 即

$$9E^2 U^2 - \omega_{pc}^2 K^2 \omega_0^2 X^2 \geq 0 \quad (17)$$

求解式 (17) 可得

$$\omega_{pc} \leq \frac{3EU}{K\omega_0 X} @ \omega_{pcmax} \quad (18)$$

为保证有功功率环路的稳定性, 必须留有足够的相角裕度 PM_p , 因此有

$$PM_p = 180^\circ + \angle G_{op}(j\omega_{pc}) = 180^\circ + \arctan\left(\frac{K}{J\omega_{pc}}\right) \geq PM_{pmin} \quad (19)$$

将式 (19) 化简后可得

$$J \leq \frac{K}{\omega_{pc}} \cot(PM_{pmin}) \quad (20)$$

由式 (20) 可知, 在 K 为定值时, J 取值越大, 则一阶惯性环节的截止频率越小, 系统的相角裕度会相应降低。因此, 为了满足有功功率环路的相角裕度要求, J 的取值不能过大。

为了使系统具备同步发电机在动态过程的振荡特性并满足上述要求, 有功功率环路的截止频率应小于电流内环截止频率的 $1/15$, 本文取截止频率为 10 Hz , 并保证 50° 的相角裕度, 可得

$$\begin{cases} |G_{op}(j\omega_{pc})| = 1 \\ 180^\circ + \angle G_{op}(j\omega_{pc}) = 50^\circ \end{cases} \quad (21)$$

求解式 (21), 可以得到 $J = 0.2$, $K = 14.95$ 。

不考虑耦合因素时, 可以得到无功功率环路的开环传递函数为

$$G_{op}(s) = \frac{K_v(K_p s + K_i)}{K_p s + s + K_i} \times \frac{3U}{X} \quad (22)$$

令 $K_p = 0$, 可知无功功率环路的开环传递函数由比例环节 $3UK_v/X$ 和一阶惯性环节 $1/(s/K_i + 1)$ 组成, 其中 K_v 由电网系统的标准决定, 因此 K_i 决定了无功功率环路中一阶惯性环节的转折频率。由于无功功率环路中的一阶惯性环节最多使系统产生 90° 的相位滞后, 即系统的相角裕度能满足系统稳定的要求。只要令无功功率环路的开环传递函数在其穿越频率 f_{qc} 处的幅值增益为 1 , 即可求出相应的 K_i , 即

$$|G_{oq}(j\omega_{qc})| = \left| \frac{3UK_v}{X} \times \frac{1}{\frac{1}{K_i} j\omega_{qc} + 1} \right| = 1 \quad (23)$$

求解式 (23) 可得

$$K_i = \omega_{qc} X \sqrt{\frac{1}{9U^2 K_v^2 - X^2}} \quad (24)$$

对式 (24) 分两种情况进行讨论:

1) 当 $9U^2 K_v^2 - X^2 > 0$ 时, 只需要将无功功率环路的穿越频率设计在内环穿越频率的 $1/10$ 以内, 便可根据式 (24) 计算出相应的 K_i 。

2) 当 $9U^2 K_v^2 - X^2 < 0$ 时, 即系统在整个频段内不存在穿越频率, 其环路的幅值增益全部在 0 dB 以下。因此需要将一阶惯性环节的转折频率 f_L 设计在内环穿越频率的 $1/10$ 以内, 即

$$f_L = \frac{K_i}{2\pi} < \frac{f_{ic}}{10} \quad (25)$$

本文设计无功电压下垂系数 K_v 的原则为: 电网电压幅值变化 50% 时, 对应的逆变器输出无功功率变化为 100% , 即

$$K_v = \frac{(380/\sqrt{3})\sqrt{2} \times 50\%}{20000 \times 100\%} = 0.00776 \quad (26)$$

将式(26)求得的 K_v 代入式(24), 满足情况1), 本文取无功功率环路的截止频率为100 Hz, 根据式(24)可求得 $K_1=46.375$ 。

3 改进的VSG控制策略

当系统的功率发生波动时, 假设输入有功由 P_0 阶跃至 P_1 , VSG会从原来的稳定运行点 a 点经过暂态过程达到新的稳定运行点 b 点, 由于惯性的存在, VSG将越过 b 点到达 c 点。此过程中VSG的功角变化是衰减振荡的, 可将其分为四个区间: $a \rightarrow b$, $b \rightarrow c$, $c \rightarrow b$, $b \rightarrow a$, 如图5所示。

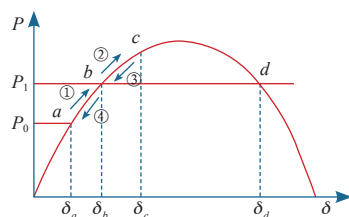


图5 VSG功角曲线

在系统暂态响应过程中, 可利用VSG参数灵活可调的优势, 根据功角、角频率等物理量的变化, 实时调节转动惯量 J 和阻尼系数 D 的大小, 以达到优化暂态响应的目的, 具体分析如下。

在区间1中, 此时VSG的虚拟转子角速度大于电网角速度, 角速度处于加速状态, 即 $\omega > \omega_g$, $d\omega/dt > 0$ 。需要利用较大的转动惯量抑制 $d\omega/dt$, 同时保持较小的阻尼系数, 防止过快的角速度增加造成转速超调。在区间2中, 虽然此时VSG的虚拟转子角速度依然大于电网角速度, 但角速度进入减速状态, 即 $\omega > \omega_g$, $d\omega/dt < 0$ 。采用较小的转动惯量即可使功率振荡到达 c 点, 同时利用较大的阻尼系数抑制角频率偏差量 $\Delta\omega$ 的增加。区间3和区间4的分析类似。因此, 转动惯量和阻尼系数的大小是由VSG的角频率与电网频率的偏差量和角频率的变化率共同决定的, 关系如下表所示。

表 不同情况下的惯量和阻尼

区间	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	J	D
$a \rightarrow b$	$\Delta\omega > 0$	$d\omega/dt > 0$	增大	D_0
$b \rightarrow c$	$\Delta\omega > 0$	$d\omega/dt < 0$	J_0	增大

(续)

区间	$\Delta\omega$	$d\omega/dt$	J	D
$c \rightarrow b$	$\Delta\omega < 0$	$d\omega/dt < 0$	增大	D_0
$b \rightarrow a$	$\Delta\omega < 0$	$d\omega/dt > 0$	J_0	增大

根据上表可以得到该控制策略的表达式如下

$$J = \begin{cases} J_0 & \Delta\omega(d\omega/dt) \leq 0 \\ J_0 + k_J |\Delta\omega| \left| \frac{d\omega}{dt} \right| & \Delta\omega(d\omega/dt) > 0 \end{cases} \quad (27)$$

$$D = \begin{cases} D_0 & \Delta\omega(d\omega/dt) \geq 0 \\ D_0 + k_D |\Delta\omega| \left| \frac{d\omega}{dt} \right| & \Delta\omega(d\omega/dt) < 0 \end{cases} \quad (28)$$

式中, J_0 和 D_0 分别为 J 和 D 的稳态值; k_J 和 k_D 分别为 J 和 D 的调节系数。

4 仿真分析

为验证本文对VSG参数分析及所提控制策略的正确性, 将通过在Matlab/Simulink中搭建仿真模型进行验证。

4.1 VSG参数分析验证

当阻尼系数 $D=15$, 转动惯量 J 分别取值为0.05、0.2和0.5时, 有功功率环路的动态响应如图6所示。由此可见, 当阻尼系数 D 取值一定时, 转动惯量 J 越大, 系统的超调量越大, 调节时间越长, 其振荡次数越多。

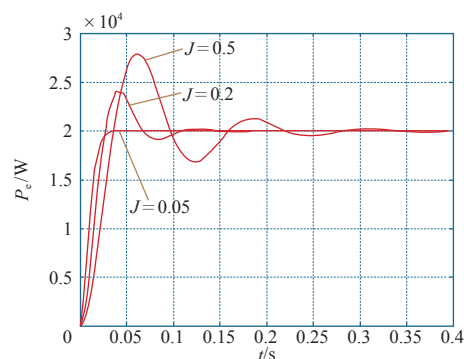


图6 转动惯量不同时系统动态响应

当 $J=0.2$, D 分别取10、15和20时, 有功功率环路的动态响应如图7所示。由图中可以明显地看出, 当转动惯量 J 一定时, 阻尼系数 D 越大, 系统的超调量越小, 调节时间越短。

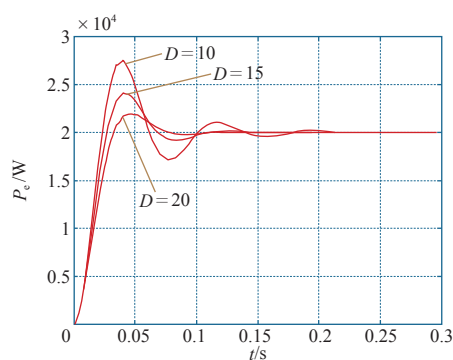


图7 阻尼系数不同时系统动态响应

通过前面的分析可知,将虚拟惯量和阻尼特性引入逆变器控制后,其输出的有功功率表现出了振荡特性,通过合理设置转动惯量和阻尼系数的取值,可以使系统具有适度的阻尼、较快的响应速度和较短的调节时间,使光伏并网逆变器能够有效地应对功率和频率的波动,从而验证了本文参数分析设计的正确性。

4.2 VSG参数自适应调节控制策略验证

稳定运行时,VSG给定有功功率为20 kW,在0.5 s时有功功率阶跃至25 kW,图8给出了不同控制策略下有功功率阶跃变化时的系统响应。

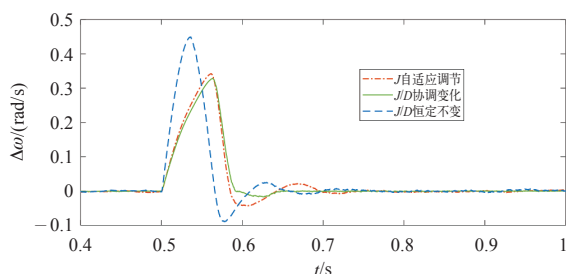


图8 不同控制策略下系统响应

从图8可以看出,当VSG的给定有功功率增加时,转子角速度为振荡变化并趋于稳定。采用传统转动惯量和阻尼系数固定不变的控制方法时(如蓝色虚线所示),其角速度振荡超调量较大,且需较长的调节过程才能达到稳态;采用转动惯量自适应调节的控制策略时(如红色点画线所示),虽然系统超调量有所减小,但仍需较长的调节时间;而采用本文所用转动惯量和阻尼系数协调变化的控制策略时(如绿色实线所示),不仅角速度振荡超调量较小,而且调节时间较

短,能快速达到稳态,使VSG动态响应过程得到明显改善。

5 结束语

VSG的稳定性和运行性能与其参数密切相关,转动惯量和阻尼系数等参数设计尤为重要。通过分析可知,转动惯量决定了有功功率环路的振荡频率,阻尼系数决定了有功功率环路的衰减速率,通过合理设置转动惯量和阻尼系数的取值,可以使系统具有适度的阻尼、较快的响应速度和较短的调节时间。本文提出虚拟惯量和阻尼系数协调变化的VSG控制策略,在给定有功功率变化时能够缩短达到稳态的时间,改善系统动态响应过程。通过搭建的仿真模型也验证了理论分析及所提策略的有效性。

参考文献

- [1] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10-14,23.
- [2] Yang X, Song Y, Wang G, et al. A comprehensive review on the development of suitable energy strategy and implementation in China[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(2): 57-65.
- [3] Li Q, Xu Z, Yang L. Recent advancements on the development of microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 206-211.
- [4] Wojszczyk B, Al-Juburi O, 王靖. 分布式发电的高覆盖率对电力系统设计和运行的影响分析[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 37-46.
- [5] 白建华,辛颂旭,刘俊,等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699-3705.
- [6] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [7] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33

- (22) : 12-18.
- [8] Borges C L T, Martins V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36 (1) : 107-116.
- [9] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (16) : 2591-2603.
- [10] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (8) : 89-93.
- [11] Bevrani H, Ise T, Miura Y. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54 (1) : 244-254.
- [12] Zeng Z, Zhao R, Yang H, et al. Single-phase virtual synchronous generator for distributed energy resource application [C]. IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, October 26-29, 2013, Busan, Korea: 6.
- [13] Wu H, Ruan X, Yang D, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (7) : 4292-4303.
- [14] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (24) : 6508-6518.
- [15] Ashabani M, Mohamed Y A I. Novel comprehensive control framework for incorporating VSGs to smart power grids using bidirectional synchronous-VSC [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29 (2) : 943-957.
- [16] Torres L M A, Lopes L A C, Moran T L A, et al. Self-tuning virtual synchronous machine: a control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29 (4) : 833-840.
- [17] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3 (2) : 451-458.
- [18] 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.
- (收稿日期: 2017-12-05) **EA**

(上接第58页)

参考文献

- [1] 马晓嘉. 基于PLC的智能交通灯控制系统控制 [J]. 城市建设理论研究, 2015 (15) : 23-25.
- [2] 田鑫. PLC在红绿灯控制系统中的应用 [J]. 科学导报, 2015 (12) : 15-17.
- [3] 赵银广. 基于PLC的控制系统仿真平台设计及其应用研究 [J]. 电子测试, 2014 (5) : 46-47.
- [4] 梁刚, 刘紫燕. PLC与组态王十字路口交通灯控制系统设计 [J]. 现代计算机, 2014 (3) : 72-76.
- [5] Jiri Koziorek, Lenka Landryova. Softplcs and their using in control applications [C]. The 5th IFAC Workshop on Programmable Devices And Systems, 2001 Gliwice, Poland, 2001: 139-143.
- [6] 杨淑莹. VC++图像处理程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [7] 胡学林, 宋宏. 电气控制与PLC [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [8] 郑阿奇. Visual C++实用教程 (3) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- (收稿日期: 2017-03-14) **EA**