

分布式电源并网惯性功率补偿研究

沈诞煜¹, 赵晋斌¹, 李吉祥¹, 屈克庆¹, 李芬¹, 宇敷修一²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 日本欧利生电气公司, 埼玉市 330-6013)

摘要: 虚拟同步电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)通过引入转动惯量提高系统频率稳定, 但相较于分布式电源(Distributed Generation, DG)传统并网模式, 其控制算法复杂, 设备成本高, 惯量设置分散。针对如何在不改变现有 DG 传统并网系统的前提下, 更简单经济地增加系统的转动惯量展开研究。首先, 分析虚拟同步电机暂态响应过程, 经过功率解耦分解出转子惯性功率。然后, 基于转子惯性功率响应特性和超级电容的运行特性, 借鉴静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC), 提出静止惯性补偿器(Static Inertia Compensator, SIC)的概念。最后, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型, 验证所提想法的有效性。结果表明, SIC 通过检测频率变化情况向节点提供惯性功率, 可以提高系统转动惯量从而增强系统频率稳定, 能够达到虚拟同步电机稳定频率的效果。

关键词: 分布式电源; 转动惯量; 功率解耦; 静止惯性补偿器; 频率稳定性

Analysis and application of inertia power compensating of grid-connected distributed generation

SHEN Danyu¹, ZHAO Jinbin¹, LI Jixiang¹, QU Keqing¹, LI Fen¹, USHIKI Shuichi²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Origin Electric Co., Ltd., Sai Yu City 330-6013, Japan)

Abstract: The Virtual Synchronous Generator (VSG) improves the frequency stability by introducing the inertia, but it is complex and costly compared to the traditional grid connected mode of Distributed Generation (DG). Its inertia setting is also dispersed. So this paper studies how to increase the virtual inertia in the distributed generation grid connected system more easily and economically. Firstly, this paper analyzes the transient response process of VSG and decomposes the rotor inertia power through the power decoupling. Secondly, based on the characteristics of the rotor inertia power response and the running characteristics of the super capacitor, referring to Static Var Compensator (SVC), the concept of Static Inertia Compensator (SIC) is proposed. Lastly, the simulation model of the static inertia compensator is built in Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed idea. The results show that SIC can provide inertia power to the node by detecting the frequency variation. It can improve the inertia of the system and enhance the frequency stability of the system and achieve the effect of frequency stabilization of VSG.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777120).

Key words: distributed generation (DG); inertia; power decoupling; static inertia compensator (SIC); frequency stability

0 引言

随着全球范围内的能源危机和环境问题的日益严峻, 分布式发电(Distributed Generation, DG)技术得到越来越多的关注^[1-7]。作为分布式电源与电网连接的重要装置, 并网逆变器被广泛应用, 但其响应速度过快、缺乏惯性, 无法为以分布式电源为主要电能来源的电网提供必要的频率支撑^[8]。借鉴传统

同步发电机(Synchronous Generator, SG)的动静态特性, 虚拟同步电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)为分布式电源稳定并网提供了解决思路^[9-10]。然而, 对比分布式电源的传统并网模式, 虚拟同步电机仍存在诸多不足之处。

文献[11]提出了一种具备同步电机特性的级联型光伏发电系统, 虚拟电机控制使系统具备同步发电机的惯性与阻尼特性, 但系统结构由多组逆变器级联而成较为繁琐, 控制算法复杂。文献[12-13]研究指出虚拟同步电机因其快速灵活的调节能力存在

同步频率谐振现象, 容易引发功率振荡, 导致系统不稳定。文献[14-17]研究了应用于微电网内的虚拟同步电机技术及微电网综合控制策略, 通过合理的能量控制维持微电网内有功平衡和频率稳定。然而微电网技术及微电网内虚拟同步电机缺乏工程应用, 其效果有待进一步验证。文献[18]研究指出储能是实现虚拟同步机系统提供惯量和阻尼的物理基础, 但储能的容量受限于环境和投资等因素, 因此根据虚拟同步机相关动态特性, 其具有运行边界限制。文献[19-20]研究指出储能单元在不同荷电状态下具有充放电的功率上限, 通过检测系统频率的变化与蓄电池荷电状态, 调节蓄电池的荷电状态变化率与充放电电流的速率, 从而短时为系统提供惯性支持, 这一特性对于虚拟同步电机转动惯量的设置具有重要影响。文献[21]研究了逆变器下垂控制策略, 经实测光伏逆变器可参与电网快速频率响应, 其响应特性与水电机组一次调频性能相当, 优于火电机组。文献[22]研究了微电网的并网和孤岛运行方式下主从控制和对等控制的相应特点和模式切换。

分析以上参考文献, 虚拟同步电机控制算法复杂, 不但控制参数需要合理选择, 所配置的储能单元的运行状态和特性也会限制虚拟同步电机的正常运行。分布式电源传统并网模式, 如下垂控制策略、PQ控制策略, 控制算法简单, 因此如何在不改变传统并网模式的基础上同时增加系统惯性从而提高系统稳定具有重要的研究价值。

鉴于以上分析, 本文提出增强DG传统并网系统惯性的新方法。本文分析虚拟同步电机暂态响应过程, 结合功率守恒定律, 通过功率解耦得出转子惯性功率。在转子惯性功率响应特性的基础上, 本文提出结合超级电容和逆变器结构的静止惯性补偿器(Static Inertia Compensator, SIC)的新概念。通过检测并网节点系统频率, 向节点提供惯性功率, 从而提高系统惯性和频率稳定。为验证本文所提方法的有效性, 在Matlab/Simulink中搭建相关模型, 结果证明该方法的有效性。

1 虚拟同步机

将传统同步发电机特性方程引入逆变器控制算法中可使逆变器表现出同步发电机相关运行特性。如将下垂特性引入逆变器中通过蓄电池的充放电可使得逆变器实现一次调频功能, 一定程度提高了系统功频稳定。无配置储能单元的PQ控制策略控制算法简单, 实际应用运行可靠, 且投入成本较低。虽然以上控制算法过程简单、易于实现, 但由于逆变器结构中缺乏与传统同步发电机转子等效的旋转设备, 逆变器并网系统缺乏惯性和阻尼特性, 当大量分布式电源并入电网后, 电网频率稳定难以保持。将转子惯性和发电机下垂特性引入逆变器控制算法的虚拟同步电机可使得逆变器实现惯量特性和一次调频功能。如图1所示为虚拟同步电机控制策略。

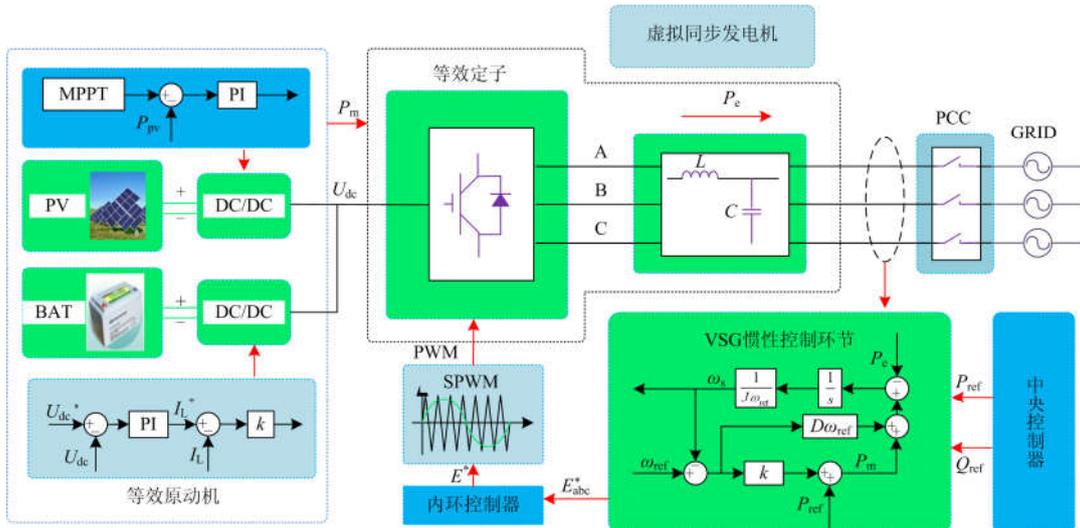


图1 虚拟同步电机控制策略

Fig. 1 Control strategy of VSG

如图2所示为虚拟同步电机相关应用效果。图2(a)为应对负荷阶跃变化的输出功率响应, 可知虚拟同步电机输出功率特性与传统同步发电机一致,

表现出二阶振荡衰减特性。图2(b)为虚拟同步电机对系统频率的改善情况, 可知系统频率稳定性提高, 且随着转动惯量的增大, 系统频率稳定性增强。

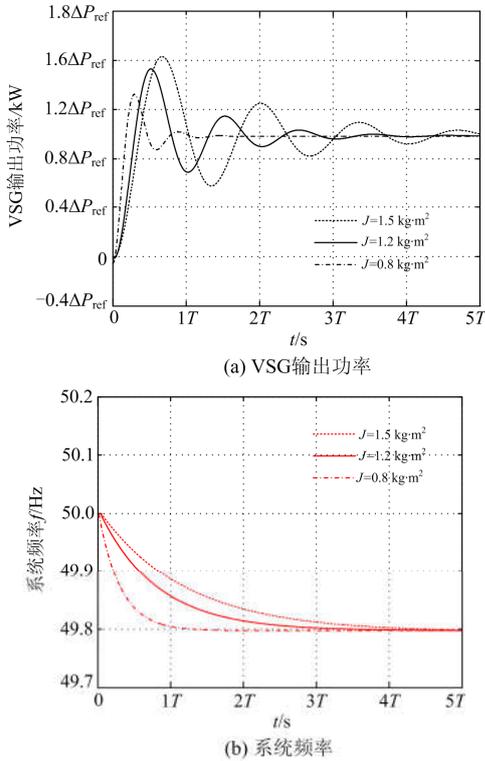


图2 虚拟同步电机效果

Fig. 2 Control effect of VSG

虚拟同步电机技术虽然可以提供下垂和PQ控制策略不具有的惯性和阻尼特性以提高系统频率稳定,但分布式电源采用虚拟同步电机模式并网时必须配置一定容量的储能单元以应对负荷波动,且要求储能单元具有较短的惯性时间常数。同时,虚拟同步电机技术的可靠运行需要综合考虑逆变器控制算法的精确性和储能单元的实时状态。因此,虽然虚拟同步电机对频率改善具有一定优势,但其控制算法较为复杂且设备成本较高、利用率低。在不改变逆变器传统并网模式的基础上,同时在系统中引入所需要的惯性具有重要的研究价值。

2 静止惯性补偿器及功率解耦

2.1 静止惯性补偿器

考虑以上问题,借鉴电力系统中静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)的设计思路,本文提出静止惯性补偿器的概念。电力系统引入静止无功补偿器可以提供本地所需无功功率,无需通过复杂的同步发电机调压方式,从而提高了同步发电机调频能力,同时静止无功补偿器调压方式更为灵活。本文在系统某节点处引入静止惯性补偿器提供系统所需惯性,此惯性引入方式运行更灵活,可以更靠近负荷侧,避免了大量虚拟同步电机并网造成的惯

量分散、控制算法过于复杂、设备投入过高的弊端,同时改善大量分布式电源并网系统中传统同步发电机惯量不足。如图3所示对比静止无功补偿器,引入静止惯性补偿器系统结构。

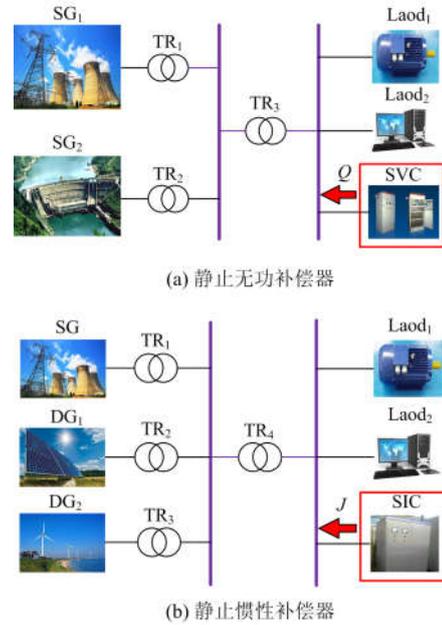


图3 补偿器对比结构

Fig. 3 Compensator contrastive structure

为实现独立的惯性补偿,需要重点研究虚拟同步电机惯性运行机理,尤其系统暂态调整过程虚拟同步电机转动惯量所起作用。比较不同的分布式电源并网技术,无论是传统同步发电机还是虚拟同步电机,在应对负荷波动时都将在功率环增加惯性功率分量,最终表现出来的惯性都将以电功率的形式流入电网,本节将进行虚拟同步电机控制过程建模,利用功率解耦的方法分析暂态过程的惯性功率及转动惯量的影响。

2.2 功率解耦

分析虚拟同步电机控制过程,可知下垂控制器表现出下垂特性,惯性控制环节表现出惯性特性,逆变器端口表现出静态下垂特性和功角特性。其中暂态调整方程包括下垂特性方程、转子运动方程、发电机电气-功角方程。静态特性方程包括发电机电气-功角方程和功频静态下垂方程。各方程表达式如下。

下垂特性方程为

$$P_m = P_{ref} + k(\omega_{ref} - \omega_s) \quad (1)$$

转子运动方程为

$$J \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{P_m}{\omega_s} - \frac{P_c}{\omega_s} - D(\omega_s - \omega_{ref}) \quad (2)$$

电气-功角方程为

$$\begin{cases} P_e = \frac{EU}{X} \sin \delta \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_s - \omega_{\text{grid}} \end{cases} \quad (3)$$

功频静态下垂方程为

$$P_e = P_{\text{ref}} + k_{\text{droop}} (\omega_{\text{ref}} - \omega_{\text{grid}}) \quad (4)$$

式中: P_m 为一次调频功率; P_e 为输出功率; P_{ref} 为额定功率; E 为逆变器出口电动势; U 为滤波器端口电压; ω_s 为转子虚拟角速度; ω_{grid} 为电网电气角频率; ω_{ref} 为额定角频率, 100π rad/s; δ 为功角; J 为转动惯量; D 为阻尼系数; k 为一次调频调节系数; k_{droop} 为发电机静态下垂系数。借鉴传统电力系统中同步发电机的小信号模型分析方法, 求解虚拟同步电机输出功率和负荷功率参考值之间的传递函数, 表达式为

$$G(s) = \frac{P_e(s)}{P_{\text{ref}}(s)} = \frac{\frac{EU}{JX\omega_{\text{ref}}}}{s^2 + \frac{D\omega_{\text{ref}} + k}{J\omega_{\text{ref}}}s + \frac{EU}{JX\omega_{\text{ref}}}} \quad (5)$$

由传递函数式(5)可知系统传函随转动惯量 J 、阻尼系数 D 的变化而变化。当系统负荷发生阶跃变化 ΔP_{ref} 时, 由于电气角频率由发电机转子角速度决定, 且两者在暂态和稳态状态下均近似相等, 联立式(1)一式(3)可得系统角频率近似表达式为

$$\frac{\omega_{\text{grid}} - \omega_{\text{ref}}}{P_{\text{ref}} - P_e} = -\frac{1}{J\omega_{\text{ref}}s + D\omega_{\text{ref}} + k} \quad (6)$$

整理后可得系统角频率时域表达式如式(7), 可知电气角频率和转子角速度表现出一阶惯性特性。且随着转动惯量的增大, 系统频率稳定性提高。

$$\omega_{\text{grid}}(t) = \omega_{\text{ref}} - \frac{\Delta P_{\text{ref}}}{D\omega_0 + k} (1 - e^{-\frac{D\omega_{\text{ref}} + k}{J\omega_{\text{ref}}}t}) \quad (7)$$

分析传统同步发电机应对电网负荷突变时, 转子转矩的不平衡使得转子角速度缓慢变化。由于转子角速度的改变, 转子将进行释放或吸收功率表现为转子动能的增减。由牛顿第二定律, 整理转子运动方程可得转子功率守恒方程为

$$P_m - D\omega_{\text{ref}} (\omega_s - \omega_{\text{ref}}) - P_e - J\omega_{\text{ref}} \frac{d\omega_s}{dt} = 0 \quad (8)$$

由一次调频调节特性和惯性特性, 定义一次调频功率为 P_m , 定义转子输出的转子惯性功率为 P_i 。由功率守恒原则、转子运动方程(2)和转子功率方程(8), 可得转子惯性功率 P_i 表达式, 同时联立式(1), 可得

$$\begin{cases} P_m = P_{\text{ref}} + k(\omega_{\text{ref}} - \omega_s) \\ P_i = -J\omega_{\text{ref}} \frac{d\omega_s}{dt} - D\omega_{\text{ref}} (\omega_s - \omega_{\text{ref}}) \end{cases} \quad (9)$$

联立式(6)一式(9)可得转子惯性功率负荷阶跃响应为

$$P_i = \frac{\frac{EU}{JX\omega_{\text{ref}}}}{s^2 + \frac{D\omega_{\text{ref}} + k}{J\omega_{\text{ref}}}s + \frac{EU}{JX\omega_{\text{ref}}}} \frac{\Delta P_{\text{ref}}}{s} - \frac{\Delta P_{\text{ref}} k}{s(J\omega_{\text{ref}}s + D\omega_{\text{ref}} + k)} \quad (10)$$

由以上内容, 虚拟同步电机输出功率表现出二阶振荡特性, 转子惯性功率表现出自振荡衰减特性。如图4给出了虚拟同步电机在负荷阶跃增大时的不同转动惯量条件下的转子惯性功率动态响应。由图4可知, 随转动惯量的增大, 同步电机转子惯性功率振荡幅值增大。

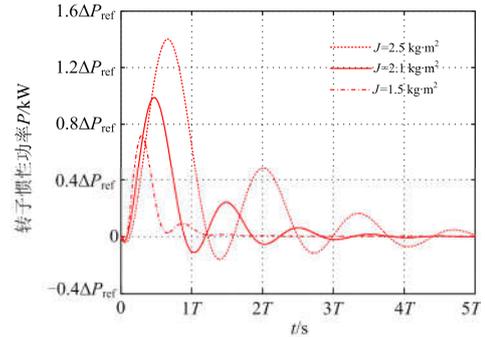


图4 转子惯性功率

Fig. 4 Rotor inertia power of SG

3 静止惯性补偿器控制策略

由上节内容, 虚拟同步电机能够提高系统频率稳定性, 其本质原因就是转动惯量。在系统频率波动的暂态过程中, 虚拟同步电机提供惯性功率, 从而系统暂态时间变长。基于这一思路, 本节设计提出了静止惯性补偿器相关结构和控制策略, 此惯性输出环节不同于虚拟同步电机, 而是仅由储能单元和逆变器结构组成, 因此静止惯性补偿器具有惯量可调、动态响应快的能力。

3.1 静止惯性补偿器结构

分析转子惯性功率动态响应特性可以发现该功率具有动态响应快, 振荡幅度大等特点。蓄电池作为静止惯性补偿的功率源, 因其结构简单, 运输方便, 安装和维护成本低, 在电力系统中常用作直流设备供电或UPS备用电源。其中, 超级电容器功

率密度较高，其充放电倍率可达 1.5 倍率以上，常用于对动态响应要求高的场合，同时充放电循环次数也更高。使用逆变器结构并网具有动态响应快，参数调节灵活等优点，借鉴分布式电源并网逆变器结构，含超级电容和逆变器的静止惯性补偿器总体结构如图 5 所示。

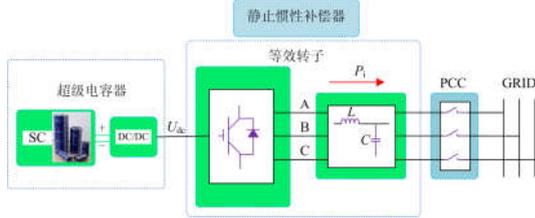


图 5 静止惯性补偿器结构
Fig. 5 Structure diagram of SIC

3.2 静止惯性补偿器控制策略

分析虚拟同步电机控制策略中惯性控制环节，

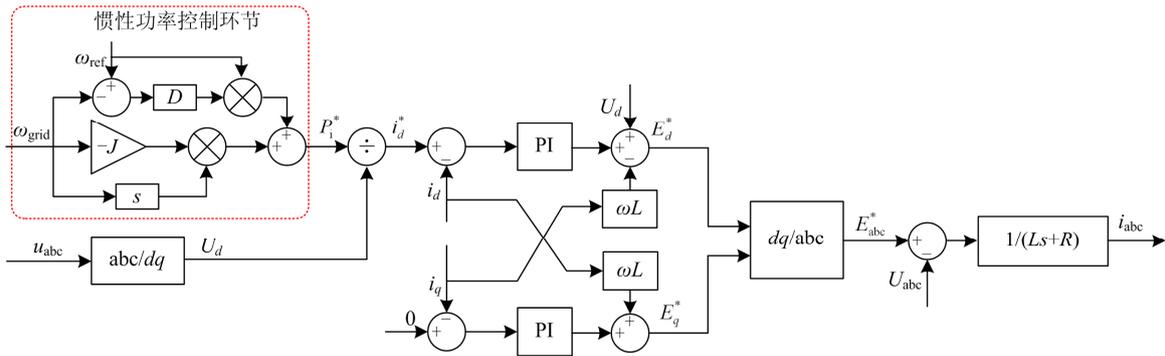


图 6 静止惯性补偿器控制结构
Fig. 6 Control structure diagram of SIC

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	取值
额定输出功率 P_{ref}	50 kW
负荷波动功率 ΔP_{ref}	20 kW
下垂系数 k	15 916
超级电容额定容量 S_n	10 kW·h
VSG 转动惯量 J	1.5 kg·m ²
SIC 转动惯量 J	1.5 kg·m ²
额定频率 f	50 Hz

4.1 下垂控制策略

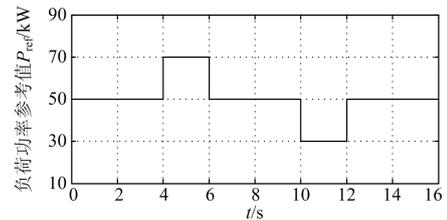
逆变器采用下垂控制策略，开始时系统在额定状态运行，输出功率为 50 kW， $t=4$ s 时系统负荷突增至 70 kW，2 s 后恢复额定运行。 $t=10$ s 时系统负荷突减至 30 kW，2 s 后恢复额定运行。图 7 所示为下垂控制策略系统仿真结果，由图 7 可知，逆变器

其功率参考量包括一次调频功率分量和转子惯性功率分量。通过将功率环中的一次调频下垂系数 k 和分布式额定功率 P_{ref} 置 0 即可得到静止惯性补偿器中惯性控制环功率参考量。如图 6 所示为静止惯性补偿器控制模型，通过检测节点频率及频率变化率并在惯性控制环节中设置期望转动惯量、阻尼系数即可使得静止惯性补偿器表现出相应的惯性功率特性，同时系统频率稳定性得到相应提高。

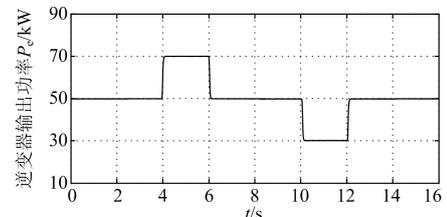
4 仿真分析

为了验证本文所提静止惯性补偿器的有效性，在 Matlab/Simulink 中构建图 3(b)所示的系统模型。分布式电源分别采用下垂控制策略、虚拟同步电机控制策略、下垂控制策略配置静止惯性补偿器，对比不同的仿真结果验证静止惯性补偿器应用效果。具体仿真参数如表 1 所示。

输出功率随负载功率的突变而突变，由于系统中无惯性提供单元系统频率动态响应很快，稳定性较低。



(a) 负荷功率参考值



(b) 逆变器输出功率

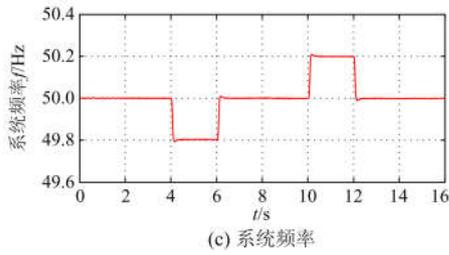


图 7 下垂控制策略仿真结果

Fig. 7 Simulation results of droop control strategy

4.2 虚拟同步电机控制策略

逆变器采用虚拟同步电机控制策略, 开始时系统在额定状态运行, 负荷波动情况同 4.1 节。图 8 所示为虚拟同步电机控制策略仿真结果, 由图 8 可知, 逆变器输出功率能够响应负荷的变化, 同时表现出和同步发电机类似的二阶振荡衰减特性。由于虚拟同步电机能够提供部分转动惯量, 系统频率的变化表现出一阶惯性环节, 稳定性得以提高。虚拟同步电机需承担一次调频功能, 由于输出功率存在较大超调量, 因此需要配置容量较大的储能单元, 同时要求储能单元响应速度较快。

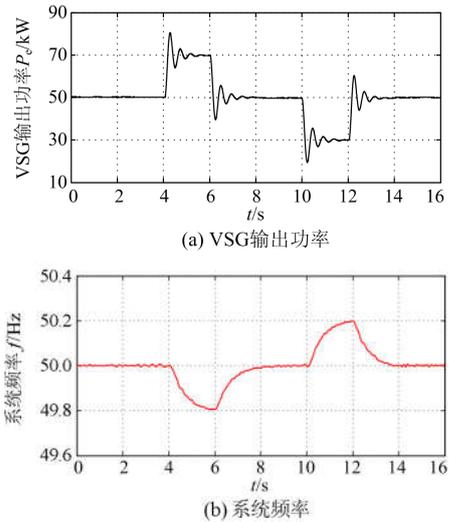


图 8 VSG 控制策略仿真结果

Fig. 8 Simulation results of VSG control strategy

4.3 静止惯性补偿器控制策略

分布式电源采用下垂控制策略, 配置转动惯量 $J=1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 的静止惯性补偿器, 负荷波动情况同 4.1 节。图 9 所示为该控制策略系统仿真结果。由图 9 可知, 分布式电源输出功率能够跟踪负荷的变化, 但仅表现出同步发电机一次调频的效果, 静止惯性补偿器表现出转子惯性功率特性。由于静止惯性补偿器能够提供类似于虚拟同步电机的转动惯量, 系统频率同样稳定性得以提高。但本系统中分布式电

源采用传统并网模式, 不改变控制算法, 因此控制算法更为简单, 参数的调整更为灵活, 提高了适用性。由图 9(c)可知, 通过设置更大的转动惯量系统频率稳定性进一步提高, 但 SIC 功率振荡幅值更大。

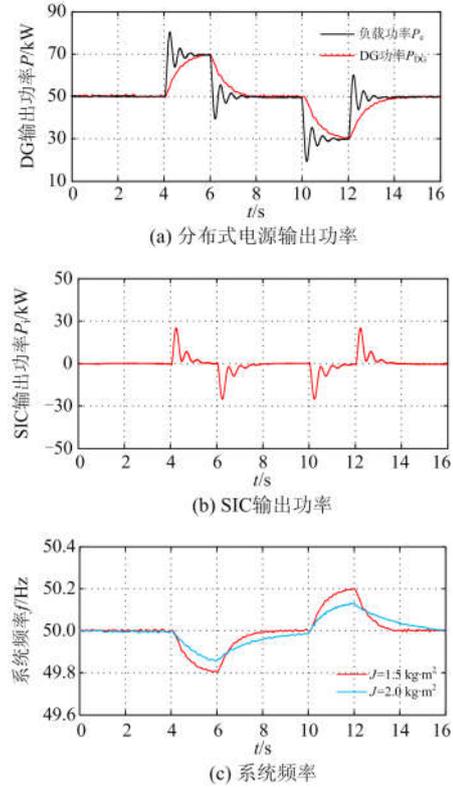


图 9 SIC 控制策略仿真结果

Fig. 9 Simulation results of SIC control strategy

为了分析储能配置容量对 SIC 控制效果的影响, 对不同储能容量 SIC 进行仿真验证对比。系统额定输出功率 50 kW, 负荷波动功率 20 kW, 超级电容额定容量 $S_n=10 \text{ kW}$, 转动惯量 $J=1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 超级电容容量分别取 $0.8S_n$ 和 $0.4S_n$ 进行仿真验证, 并与下垂控制以及额定容量 S_n 时进行比较。图 10 所示为超级电容不同容量时的仿真结果, 由图 10 可知容量为 $0.4S_n$ 时系统频率波动大, SIC 稳定频率效果较差; 而 $0.8S_n$ 时 SIC 仍有一定稳定频率的效果, 因此配置储能容量时不宜过小, 一般不小于 0.5 倍

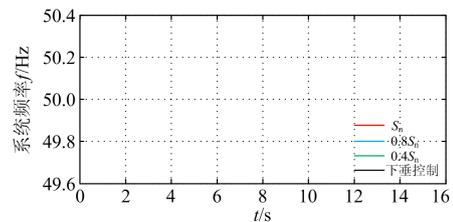


图 10 SIC 控制策略仿真结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation results of SIC control strategy

最大负荷波动功率。补偿大容量机组的惯性功率时,系统负荷波动功率大,超级电容容量也需要随之增大。但考虑大容量超级电容的成本因素,SIC将更多地适用于机组容量较小的微网系统中。SIC超级电容容量的配置,受系统机组容量、负荷波动功率大小以及成本等多种因素影响,设置时应因地制宜综合考虑。

5 结论

本文在比较了虚拟同步电机技术和分布式电源传统并网模式优缺点的基础上,借鉴静止无功补偿器在系统中引入静止惯性补偿器。通过虚拟同步电机转子惯性功率解耦特性分析,设计静止惯性补偿器系统结构和相关控制策略。经仿真验证,该方法同样起到了稳定系统频率的作用,具体结论如下。

1) 本文中所提策略不改变分布式电源传统并网模式,保留了逆变器控制算法简单、储能单元配置独立等优点,从而提高了分布式电源并网的适用性和标准性。

2) 静止惯性补偿器可以提供独立的惯性补偿,在改善系统暂态响应性能方面取得了虚拟同步发电机的效果,同时又弥补了虚拟同步电机控制算法过于复杂、惯量设置分散、设备利用率低等缺点,减小了投入成本。

3) 静止惯性补偿器实现了一次调频和惯性控制的解耦控制,从而提高了控制的灵活性。通过改变惯性参数的独立设置,可以大大提高系统频率的稳定性,为新能源并网提供了新的解决思路。

4) 静止惯性补偿器储能容量实际配置时,需要综合考虑机组容量、负荷波动功率等因素。随着大容量超级电容技术不断完善,成本不断降低,静止惯性补偿器也将适用于更多的应用场景。

参考文献

- [1] 易永辉,任志航,马红伟,等. 分布式电源高渗透率的微电网快速稳定控制技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 31-36.
YI Yonghui, REN Zhihang, MA Hongwei, et al. Study on fast stable control technology of high permeability micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 31-36.
- [2] JAKHAR S, SONI M S, GAKKHAR N. Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 41-59.
- [3] 刘舒,李正力,王翼,等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
- LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [4] 葛浩天,张新慧. 基于分布式清洁能源系统的微电网聚合模型[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 125-131.
GE Haotian, ZHANG Xinhui. Research on polymerization model of microgrid based on distributed clean power system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 125-131.
- [5] 左向红,陈斌,张啸宇,等. 分布式发电系统电能质量评估指标研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(4): 99-104.
ZUO Xianghong, CHEN Bin, ZHANG Xiaoyu, et al. Research on the power quality evaluation indices of distributed generation[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(4): 99-104.
- [6] JAKHAR S, SONIM S, GAKKHAR N. Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60(6): 60-74.
- [7] 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): 90-97.
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): 90-97.
- [8] ZHONG Qingchang, NGUYEN P L, MA Zhenyu, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [9] 张波,颜湘武,黄毅斌,等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.
- [10] 侍乔明,王刚,付立军,等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 783-790.
SHI Qiaoming, WANG Gang, FU Lijun, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 783-790.
- [11] 涂春鸣,兰征,肖凡,等. 具备同步电机特性的级联型

- 光伏发电系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 433-444.
- TU Chunming, LAN Zheng, XIAO Fan, et al. Study on cascaded H-bridge photovoltaic power systems with synchronous generator characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 433-444.
- [12] 王金华, 王宇翔, 顾云杰, 等. 基于虚拟同步发电机控制的并网变流器同步频率谐振机理研究[J]. 电源学报, 2016, 14(2): 17-23.
- WANG Jinhua, WANG Yuxiang, GU Yunjie, et al. Synchronous frequency resonance in grid-connected VSCs with virtual synchronous generator technology[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(2): 17-23.
- [13] 孔剑虹, 姜学朴, 吴江宁, 等. 梯度因子估计虚拟同步发电机阻尼的配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 103-109.
- KONG Jianhong, JIANG Xuepu, WU Jiangning, et al. Damping configuration of the virtual synchronous generator using gradient factor estimation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 103-109.
- [14] 王振雄, 易皓, 卓放, 等. 应用于光伏微网的一种虚拟同步发电机结构及其动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 444-454.
- WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. The structure and dynamic performance analysis of a virtual synchronous generator applied to the photovoltaic microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 444-454.
- [15] 曾正, 邵伟华, 李辉, 等. 孤岛微网中虚拟同步发电机不平衡电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 372-381.
- ZENG Zheng, SHAO Weihua, LI Hui, et al. Unbalanced voltage control of virtual synchronous generator in islanded micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 372-381.
- [16] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变流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.
- [17] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 基于虚拟同步发电机的多能互补微网运行控制技术[J]. 太阳能学报, 2017, 38(7): 1869-1876.
- SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Multi energy complementary micronetwork operation control technology based on virtual asynchronous generator[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(7): 1869-1876.
- [18] 袁敞, 刘昌, 赵天扬, 等. 基于储能物理约束的虚拟同步机运行边界研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 506-516.
- YUAN Chang, LIU Chang, ZHAO Tianyang, et al. Research on operating boundary of virtual synchronous machine based on physical constraint of energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 506-516.
- [19] 王晓东, 郑帅, 刘颖明, 等. 基于储能系统 SOC 反馈调节的变参数风电场虚拟惯量补偿控制[J]. 电器与能效管理技术, 2017, 13(2): 8-15.
- WANG Xiaodong, ZHENG Shuai, LIU Yingming, et al. Virtual inertia compensation control of wind farm based on SOC feedback regulation of energy storage system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017, 13(2): 8-15.
- [20] 张祥宇, 杨黎, 朱晓荣, 等. 光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 1-6.
- ZHANG Xiangyu, YANG Li, ZHU Xiaorong, et al. Virtual rotational inertia control of PV generation system with energy storage devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 1-6.
- [21] 孙骁强, 刘鑫, 程松, 等. 光伏逆变器参与西北送端大电网快速频率响应能力实测分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2792-2798.
- SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Song, et al. Actual measurement and analysis of fast frequency response capability of PV-inverters in Northwest Power Grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2792-2798.
- [22] 田梁玉, 唐忠, 田晨, 等. 基于状态跟随器的微电网平滑切换研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1285-1290.
- TIAN Liangyu, TANG Zhong, TIAN Chen, et al. Research of microgrid seamless switching based on state follower[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1285-1290.

收稿日期: 2018-09-13; 修回日期: 2019-03-12

作者简介:

沈诞煜(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能和逆变器控制技术; E-mail: 412925098@qq.com

赵晋斌(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为现代电力电子技术及其在新能源发电与电力系统中的应用。E-mail: zhaojinbin@shiep.edu.cn

(编辑 周金梅)