

微电网一次调频方法分析研究

张 礼

神华准格尔能源有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：储能技术通过改变其并网控制方式可有效提升高渗透率新能源并入微电网的一次调频能力，但是采用何种一次调频策略的调频效果更好待续研究。首先介绍基于储能的微电网虚拟同步发电机一次调频策略原理与各部分结构框图，然后针对下垂控制存在的缺少惯量的问题，在下垂控制中引入频率响应环节得到改进下垂控制。最后，通过MATLAB/Simulink平台对基于虚拟同步发电机、下垂控制、改进下垂的调频策略进行仿真验证，结果表明改进下垂比传统下垂控制的微网频率支撑能力更强。在三种调频控制策略中，虚拟同步发电机的储能调频速度以及稳定性最佳，具有良好应用前景。

关键词：储能技术；一次调频；虚拟同步发电机；下垂控制；虚拟惯量

1 引言

系统频率稳定是保证微电网正常运行的必要条件，而随着大量分布式电源如储能等新能源接入微电网，发电设备本身不具备一次调频能力与响应系统频率变化的惯性，导致微电网调频能力大大下降^[1-3]，严重危害微电网频率稳定性。为提高储能设备的调频能力，现在的技术大部分都是在并网逆变器的控制环节中附加频率响应。常见的控制环节主要有下垂控制、虚拟同步发电机控制等。下垂控制虽然有利于解决微电网中各发电机之间没有通信联络线时的功率分配问题^[4]，但是可能发生系统电压幅值、频率跌落额定值和产生功率环流等情况^{[5][6]}，而且下垂控制对电网的惯性和阻尼支撑能力不足，容易引起线路功率振荡^[7]。而虚拟同步发电机技术通过模拟同步发电机外特性，不仅实现了微网调频调压，还提升了对微网的惯性支撑能力^{[8][9]}，随着储能等分布式电源应用越来越广泛，该技术具有广阔的应用前景。

目前针对储能设备参与微电网一次调频的研究主要集中在并网逆变器的控制方式上，文献^[10]研究了储能系统参与调频的可行性，提出储能系统可用下垂控制和虚拟惯性控制参与一次调频。文献^[11]提出了一种可变系数下垂控制和虚拟惯量结合的电池储能一次调频策略，实现对电网频率的支撑，保障储能系统的运行安全。文献^[12]针对微网频率调节时改变虚拟同步发电机控制的惯性系数会导致系统不稳定的问题，提出一种混合储能不用改变惯量系数的虚拟同步发电机调频控制策略。文献^[13]针对虚拟同步发电机控制参数对一次调频和阻尼振荡功能区分不明确的问题，改进了虚拟同步发电机的调节器，改善其频域响应特性。综上所述，下垂控制与虚拟同步发电机均可参与储能微电网的一次调频，但以上文献均未

有对比两种微网调频策略的调频效果。

针对该问题，本文首先对储能微电网的一次调频策略的原理进行介绍与分析，然后通过MATLAB/Simulink进行仿真建模，对储能微电网的三种调频策略展开仿真对比研究。

2 基于虚拟同步发电机的一次调频策略

2.1 虚拟同步发电机的数学模型

本文是通过引入虚拟惯量对虚拟同步发电机进行建模仿真，因此可采用同步发电机的二阶机电暂态模型^[14]。该模型包括转子机械方程和定子电压方程。取参考轴为同步旋转轴，取极对数 $P = 1$ ，则电角速度与机械角速度的关系为 $\omega = p\Omega$ 。同步发电机的转子运动机械方程如下式：

$$\begin{cases} P_m - P_e - D\omega_n(\omega_m - \omega_n) = J\omega_n \frac{d\omega_m}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中 P_m 表示机械功率， P_e 表示电磁功率， ω_m 表示虚拟同步发电机控制下输出的角速度， ω_n 表示额定角速度， J 和 D 分别定义为虚拟惯量系数和阻尼系数。

由功率与转矩的关系式可知：

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_n}, T_e = \frac{P_e}{\omega_n}$$

利用两式将同步发电机的转子方程式进行简化，得到下式：

$$T_m - T_e - D(\omega_m - \omega_n) = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2)$$

式中 T_m 表示机械转矩， T_e 表示电磁转矩。该式进一步揭示了同步发电机转子内部转矩、转速以及转动惯量之间的关系。

同步发电机的定子端向电网输送电压，其定子电压

方程为:

$$\dot{E}_m = \dot{U} + \dot{I}(R_a + jX_s) \quad (3)$$

式中, \dot{E}_m 表示同步发电机定子端的励磁电动势, \dot{U} 表示同步发电机电枢的端电压, \dot{I} 表示同步发电机的电枢电流, R_a 表示同步发电机的电枢电阻, X_s 表示同步发电机的电枢电抗。

为了准确模拟同步发电机的外特性,减少大规模新能源并网所带来的低频振荡等不良影响,在虚拟同步发电机的控制策略中引入了下垂控制策略和虚拟惯量控制策略,这样就使虚拟同步发电机建立的模型具有类似于同步发电机的惯量、阻尼、有功调频、无功调压等外特性^[9],增强对电网的支撑作用。虚拟同步发电机的控制框图如图1所示。

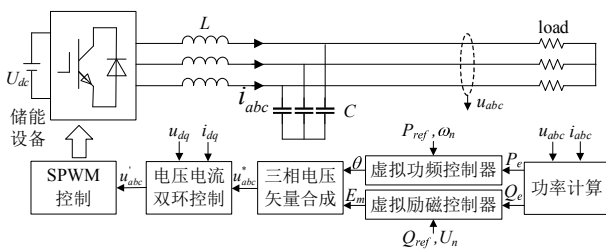


图1 基于虚拟同步发电机的微网框图

2.2 虚拟功频控制器的设计

虚拟同步发电机对传统同步发电机外特性的模拟以及对输出频率、励磁电动势的调整都是通过虚拟同步发电机的虚拟功频控制器和虚拟励磁控制器实现的。首先对虚拟功频控制器的设计进行介绍。

由简化后的同步发电机转子运动方程式(2)可得到如下的虚拟功频控制器控制框图,如图2所示。

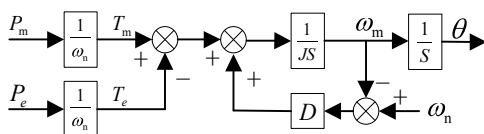


图2 虚拟功频控制器的控制框图

在大规模新能源并网的背景下,电网要求并网逆变器要具有一定的调频能力。为此在虚拟同步发电机的虚拟功频控制环节添加有功-频率下垂控制来实现与传统同步发电机类似的下垂特性。对虚拟发电机输入的机械功率 P_m 进行处理可得到如下的有功-频率下垂控制方程:

$$P_m = P_{ref} + K_p(\omega_n - \omega_m) \quad (4)$$

式中 P_m 为机械功率, P_{ref} 为有功功率给定值, K_p 为频率下垂控制系数。

2.3 虚拟励磁控制器的设计

电力系统运行过程中,虚拟同步发电机要实现稳定

电网电压的功能。当线路阻抗变化较大时,传统的无功控制容易出现环流和功率分配不均的问题。与传统的无功控制不同,本文在无功-电压控制环节中加入PI环节,在实现一次调压的基础上提高系统鲁棒性,如图3所示。

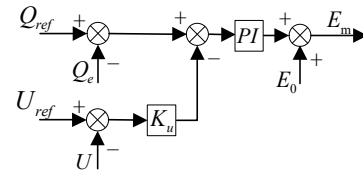


图3 含有PI环节的无功控制

3 基于下垂控制的一次调频策略

下垂控制的目的是模拟出传统发电机的一次调频曲线,常规的下垂控制结构比较简单,能够对系统频率跌落快速响应。由于下垂控制在系统发生故障或功率振荡时不能提供转动惯量,所以将系统频率变化值附加到下垂控制的有功频率控制环节,使下垂控制对系统频率变化也有惯性响应,得到如图4所示的改进下垂控制^[15]。

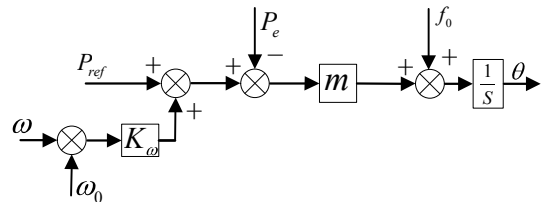


图4 改进下垂控制

图中, ω 、 ω_0 分别为锁相环得到的系统角频率和给定角频率, f_0 为给定频率值, m 、 K_ω 分别为有功下垂系数和频率惯性系数, P_e 为计算所得的有功功率, P_{ref} 为有功功率给定值, m 为有功下垂系数。

4 不同一次调频控制策略的仿真对比

为对比不同的一次调频控制策略效果,针对虚拟同步发电机控制、下垂控制以及改进下垂控制,在MATLAB/Simulink中搭建了基于储能的虚拟同步发电机、下垂控制、改进下垂微电网发电系统并进行了相关仿真与分析。

虚拟同步发电机的各部分仿真参数如表1所示。

表1 虚拟同步发电机的仿真参数

参数	数值	参数	数值
U_{ref}/V	220	开关频率/Hz	5000
U_{dc}/V	700	J	0.4
f_n/Hz	50	D	200
L/mH	81	K_p	80
C/ μF	0.6	K_u	300

常规下垂控制仿真模型的各部分仿真参数如表2所示。

表2 下垂控制仿真参数

参数	数值	参数	数值
U_{dc}/V	700	L/mH	81
E_0/V	311	$C/\mu F$	0.6
$\omega_0/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	100π	m	$3.5e^{-4}$
开关频率/Hz	5000	n	$3e^{-4}$

改进下垂控制仿真模型的各部分仿真参数如表3所示:

表3 改进下垂控制仿真参数

参数	数值	参数	数值
U_{dc}/V	700	L/mH	81
E_0/V	311	$C/\mu F$	0.6
$\omega_0/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	100π	m	$3.5e^{-4}$
开关频率/Hz	5000	n	$3e^{-4}$
		Kw	60

4.1 功率跟随仿真

为保证新能源并网的稳定性,要求新能源并网运行时具备电网二次调频能力,所以虚拟同步发电机需要实现功率的跟随控制。设置三个仿真模型的初始有功、无功负载均为2kW/0var,当仿真运行至0.5s时,有功、无功负载突变为3kW/1kvar,观测到不同调频策略的功率变化情况如图5所示。

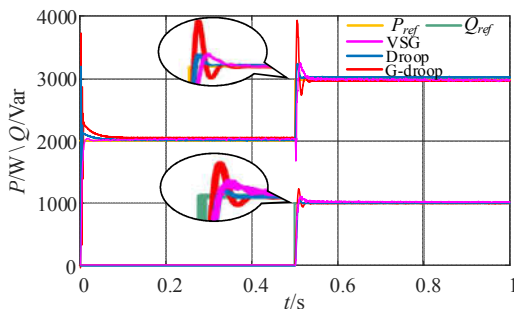


图5 不同调频策略的功率跟随仿真

图中, P_{ref} 、 Q_{ref} 分别表示有功、无功功率的给定值。

由上图可看出,三种调频策略均能满足有功、无功功率跟随的要求。下垂控制反应迅速,运行至0.53s时就能达到指定功率。改进下垂功率有短暂的振荡现象,振荡时间持续0.06s左右,并且功率超调量较大,约为指定功率的30%。虚拟同步发电机功率超调量最小,约为指定功率的8%,其功率变化较缓慢,运行至0.55s时达到指定功率,但是消除了功率振荡现象。在功率跟随实验中,下垂控制比改进下垂更快到达指定功率,虚拟同步发电机比下垂控制慢0.02s到达指定功率,验证了虚拟同步发电机的虚拟惯性效果。

4.2 一次调频性能对比验证

为验证虚拟同步发电机与下垂控制在一次调频过程

中的不同调节效果,现将下垂控制、改进下垂控制与虚拟同步发电机的一次调频控制效果相比较。

设置初始负载均为2kW/0Var,当仿真运行至0.5s时,负载突增为2.5kW/0Var,观测三种控制策略的功率与频率变化如图6、7所示。

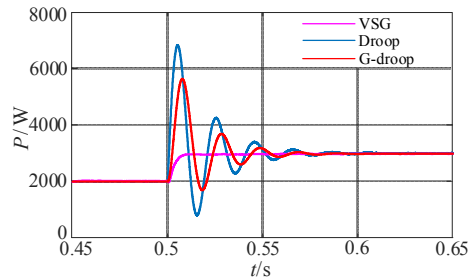


图6 一次调频功率对比

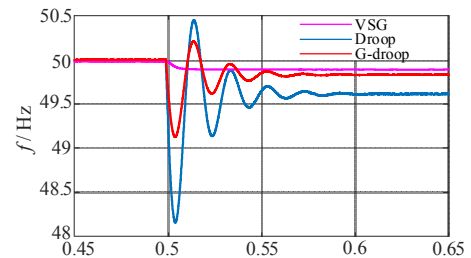


图7 一次调频频率对比

由图6、7可以看出,当负载突增时,三种调频方式均降低系统频率以主动支撑负载变化。在保证下垂控制与改进下垂系数相同的条件下,改进下垂功率稳定速度比下垂控制更快。下垂控制的功率最大振荡幅值约为6.8kW,而改进下垂约为5.7kW。下垂控制的频率最大振荡幅值约为48.8Hz,改进下垂约为49.8Hz,从而验证了频率惯性响应对系统频率的支撑作用。虚拟同步发电机运行至0.51s时达到功率稳定,改进下垂则运行至0.57s,虚拟同步发电机的功率稳定速度更快。虚拟同步发电机的频率跌落为0.1Hz,改进下垂约为0.2Hz,虚拟同步发电机的频率跌落更小,且频率的稳定速度也比较快,没有振荡现象,验证了虚拟同步发电机的调频效果比下垂及改进下垂控制更好。

5 结束语

本文基于储能的微电网电路结构,分析下垂控制、改进下垂控制、虚拟同步发电机的调频原理,设计仿真实验,对三种调频策略功率跟随、调频性能进行验证。通过仿真对比结果可以看出,在微电网一次调频过程中,虚拟同步发电机的功率稳定速度较下垂控制快0.09s,较改进下垂快0.06s。频率跌落较下垂控制小0.3Hz,较改进下垂小0.1Hz。虚拟同步发电机相比下垂

控制和改进下垂控制,在调频速度及稳定性方面表现更好,更适合应用在基于储能的微电网控制环节。

参考文献

- [1]F. Chen, R. Burgos, D. Boroyevich, et al. Investigation of nonlinear droop control in dc power distribution systems: load sharing, voltage regulation, efficiency, and stability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9404-9421.
- [2]S. Zhang, Y. Mishra, M. Shahidehpour. Fuzzy-logic based frequency controller for wind farms augmented with energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1595-1603.
- [3]艾欣,董春发.储能技术在新能源电力系统中的研究综述[J].现代电力,2015,32(5):1-9.
- [4]米阳,蔡杭谊,宋元元,等.基于同步补偿的孤岛微电网无功均分研究[J].电工技术学报,2019,34(9):1934-1943.
- [5]赵巍,齐磊,孙孝峰,等.孤岛微电网电压及频率双重优化控制策略研究[J].太阳能学报,2017,38(6):1567-1576.
- [6]金国彬,罗安,陈燕东,等.基于P-V下垂系数修正的并联逆变器输出功率按比例分配实现[J].电工技术学报,2016,31(2):112-120.
- [7]Y. Zhang, X. Qu, M. Tang, et al. Design of nonlinear droop control in DC microgrid for desired voltage regulation and current Sharing Accuracy[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 168-175.
- [8]ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [9]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(02):349-360.
- [10]许宏远.储能参与含风电的电力系统的调频策略研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [11]吴林林,刘辉,高文忠,等.大容量电池储能参与电网一次调频的优化控制策略研究[J].华北电力技术,2017(03):32-38.
- [12]赵伟,李雄,乔仁飞,等.基于混合储能的孤岛微网VSG控制策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):33-40.
- [13]颜湘武,贾焦心.VSG一次调频和转速振荡阻尼的解耦控制方案[J].电网技术,2019,43(05):1566-1575.
- [14]钟庆昌.虚拟同步机与自主电力系统[J].中国电机工程学报,2017,37(02):336-349.
- [15]X. Meng, J. Liu, Z. Liu. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.