

虚拟同步发电技术控制设计方法的研究与优化

高庆瑜¹ 王刚²

1. 丹东金山热电有限公司, 辽宁 丹东 118000

2. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136

[摘要] 新型电力系统以源(发电)、网(输电)、负荷(用电)、储能的一体化为主体, 这是电力系统发展的重要方向。随着新能源的增加, 传统的同步发电机可能会减少, 导致电力系统的惯性和阻尼减小, 从而可能引发电力系统的稳定性问题。虚拟同步控制技术可以模拟同步发电机的运行特性, 提高新能源发电系统对电网的主动支持能力, 有助于解决由于同步发电机减少带来的稳定性问题。本文基于虚拟同步机(VSG)控制表达式和网络型控制结构, 提出了一种协调控制方法, 用于调整惯性和阻尼参数, 最后通过 Matlab/Simulink 软件对提出的协调控制方法进行了仿真验证, 实验结果表明了虚拟同步控制在新型电力系统中应用对于实现能源转型和电力系统的可持续发展具有重要意义。

[关键词] 新能源; 同步发电; 控制技术

DOI: 10.33142/hst.v7i11.14313

中图分类号: TM34

文献标识码: A

Research and Optimization of Control Design Method for Virtual Synchronous Power Generation Technology

GAO Qingyu¹, WANG Gang²

1. Dandong Jinshan Thermal Power Co., Ltd., Dandong, Liaoning, 118000, China

2. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, Liaoning, 110136, China

Abstract: The new type of power system, with the integration of sources (power generation), networks (power transmission), loads (electricity consumption), and energy storage as its main body, represents an important direction in the development of the power system. With the increase of new energy, traditional synchronous generators may decrease, leading to a reduction in inertia and damping of the power system, which may cause stability issues in the power system. Virtual synchronous control technology can simulate the operating characteristics of synchronous generators, improve the active support capability of new energy generation systems for the power grid, and help solve stability problems caused by the reduction of synchronous generators. This article proposes a coordinated control method based on the control expression of virtual synchronous machine (VSG) and network-based control structure, which is used to adjust inertia and damping parameters. Finally, the proposed coordinated control method is simulated and verified through Matlab/Simulink software. The experimental results show that the application of virtual synchronous control technology in new power systems is of great significance for achieving energy transformation and sustainable development of power systems.

Keywords: new energy; synchronous power generation; control technology

引言

微电网是一种小型、局部的电力供应系统, 它能够独立于中央电网运行, 也可以与中央电网并网运行。微电网通常包括分布式发电资源、储能系统、电力电子变流器、负荷管理、控制系统和通信系统。国内外学者对光储微电网及其控制策略进行了广泛研究, 许多国家建立了示范工程并通过实验验证控制策略。国外研究侧重于微电网的智能化、个性化和多元化, 以提升系统稳定性、建设灵活性和接入便利性。中国积极引进国外技术, 深入研究核心技术, 并针对国内地域和经济状况, 进一步研究新理论, 以提高系统稳定性和运行安全性。

1 虚拟同步发电机基本原理

虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)是基于光伏发电的并网特性, 利用虚拟同步发电机

的方式对其进行并网控制是一种较为有效的方法。虚拟同步发电机可利用电力电子变换器实现对光伏电站输出电力的平稳调节, 以满足电网对电压、频率、相位等参数的要求。这种调节保证光伏电站的输出与电网保持一致, 从而实现并网发电。

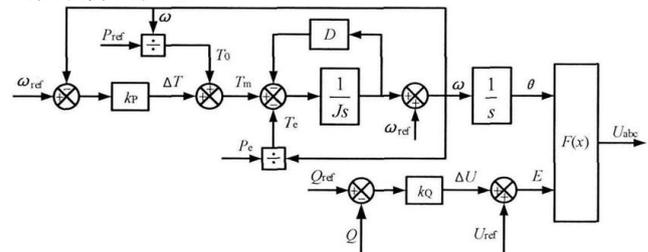


图1 虚拟同步发电机核心控制框图

在并网过程中, 需要制定和实施有效的保护和控制策

略,以防止电网故障对光伏电站的影响,同时也要保护电网的稳定性和可靠性。虚拟同步发电机通过对光伏电站输出电力的实时监测和控制,实现对光伏电站能量的有效管理,并可优化光伏电站的运行方式,提高光伏发电的效率和稳定性。虚拟同步发电机核心控制框图 1 所示。

2 虚拟同步发电机控制结构

同步发电机转子运动的二阶方程描述了转子角速度与电网频率之间的关系,以及转子的惯性和阻尼特性。这个方程通常具有以下形式:同步电机转子运动的二阶方程为:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + d \frac{d\theta}{dt} = T_m - T_e \quad (1)$$

式中: J 是转子的惯性常数。

θ 是转子的位置角。

d 是阻尼系数。

T_m 是机械转矩(输入到转子的)。

T_e 是电磁转矩(由电网施加到转子的)

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{d\tau} &= T_m - T_e - D_p(\omega - \omega_0) \\ &\approx \frac{P_0}{\omega_0} - \frac{P}{\omega_0} - D_p(\omega - \omega_0) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: J 为同步电机的转动惯量; T_m 是机械转矩; T_e 电磁转矩; D_p 是阻尼系数。

优化 VSG 虚拟同步发电机的 P-f (有功-频率) 和 Q-U (无功-电压) 控制分支的比例和阻尼系数,提高动态响应。本文基于 P-f 控制支路, VSG 变换器实现了自同步。VSG 控制结构如图 2 所示。控制策略的 P-f 分支模拟同步发电机的转子运动方程,以产生系统频率。下垂控制结构可用于 Q-U 控制分支,但很难实现无误差跟踪。因此,在 Q-U 支路中引入了一个反馈回路。控制结构与 P-f 支路一致,使 Q-U 支路呈现二阶特性并具有一定的惯性特性,其中 τ 是 Q-U 支路的比例系数, D_p 是 Q-U 支管的阻尼系数。VSG 控制表达式为:

$$\begin{cases} \omega^* = \frac{1}{J_s} (D_p(\omega_0 - \omega^*) + (P_0 - P)) \\ U^* = \frac{1}{\tau_s} (D_q(U_0 - U^*) + (Q_0 - Q)) \end{cases} \quad (3)$$

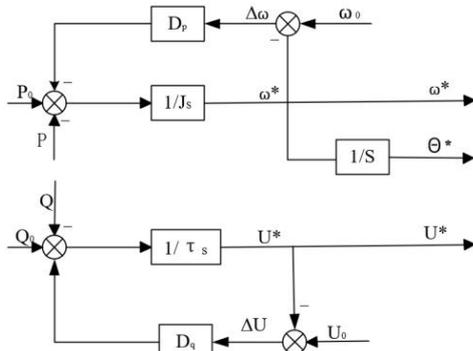


图 2 VSG 控制结构

3 分析转动惯量和阻尼系数对频率的影响

转动惯量和阻尼系数是影响虚拟同步机(VSG)并网性能的两个关键参数,它们对系统频率稳定性有显著影响。转动惯量是衡量 VSG 对频率变化惯性的量度。较大的转动惯量意味着 VSG 对频率变化的响应更慢,但同时也意味着系统能够更好地维持频率稳定,抵抗快速的频率波动。不同转动惯量下的频率变化曲线可能显示出不同程度的频率波动幅度和恢复速度。较大的转动惯量可能导致较小的频率波动,但恢复到稳定状态所需的时间也可能更长。阻尼有助于减少系统的振荡,加快频率恢复到稳定状态。不同阻尼系数下的频率变化曲线可能显示出不同程度的振荡幅度和频率恢复速度。较大的阻尼系数可能减少振荡,使系统更快地达到新的稳定状态,但过大的阻尼也可能导致系统响应变得过于迟缓。当 VSG 模拟可再生能源的有功功率波动并网时,系统的频率会受到影响。转动惯量和阻尼系数决定了 VSG 对这种波动的适应能力和频率稳定性。理想情况下, VSG 应该能够快速响应电网需求,同时保持系统的频率稳定。这需要在转动惯量和阻尼系数之间找到一个平衡点。

VSG 具有惯性和阻尼特性。有必要分析转动惯量和阻尼系数对 VSG 并网的影响。当 VSG 以给定的有功功率波动(模拟可再生能源的波动)连接到电网时, VSG 在不同转动惯量和不同阻尼系数下的频率变化曲线分别如图 3 和图 4 所示。

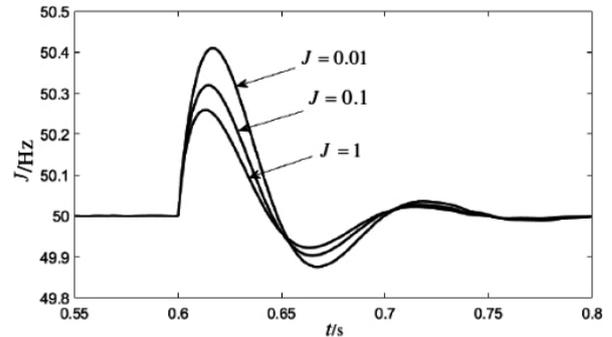


图 3 不同转动惯量的频率曲线

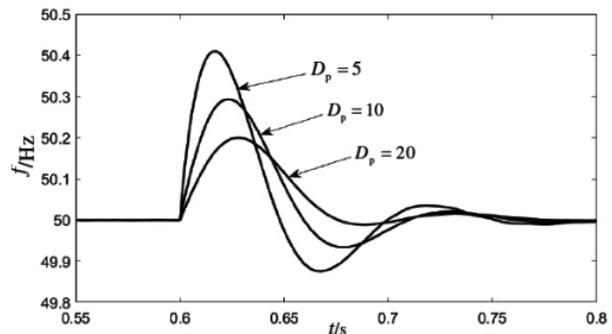


图 4 不同阻尼系数的频率曲线

从图 3 可以看出,转动惯量主要影响频率的超调。从图 4 可以看出,阻尼系数主要影响频率的衰减率。为了详

细分析转动惯量和阻尼系数对频率稳定性的影响,将频率稳定性的性能指标分为响应速度、频率超调、调整时间和峰值时间。惯性矩 J 和阻尼系数 D_p 的增加对频率稳定性的影响。

4 惯性阻尼协同自适应控制的仿真分析

惯性阻尼协同自适应控制的仿真步骤,本文提出的惯性阻尼协同适应性控制策略在 $t=0.6s$ 时将给定的有功功率 P_{set} 从 $10kW$ 增加到 $15kW$ 。图 5 显示了给定功率浪涌情况下 VSG 频率 f 的变化曲线。

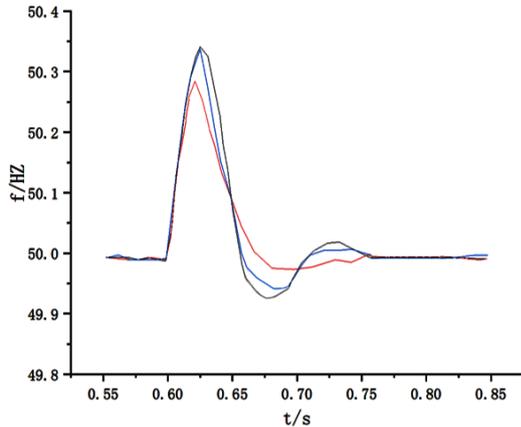


图 5 VSG 突然功率增加时的频率波形

对惯性阻尼协同自适应控制的仿真结果进行了分析:在图 5 中,当 P_{set} 增加时,惯性阻尼协同控制调节动作响应迅速,有功功率 P_{set} 从 $10kW$ 降低到 $5kW$ 。

VSG 频率 f 的变化曲线如图 6 所示清楚地看到,惯性阻尼协同自适应控制抑制了频率和功率瞬态响应中的超调,加快了瞬态响应速度,总体上提高了系统的稳定性。

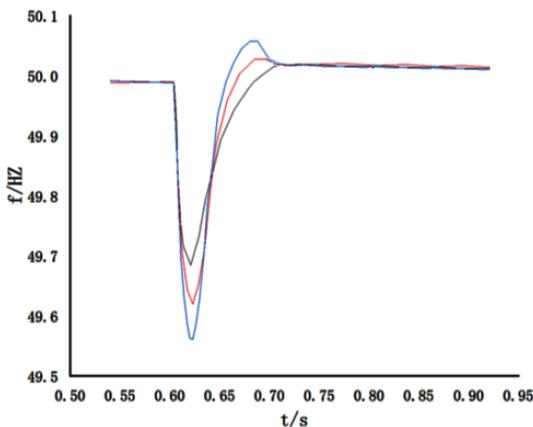


图 6 功率突降 VSG 的频率波形

综上所述,依据全局扰动情况调整频率,降低频率超调,提速且平稳进行适当调整,优化系统频率动态响应过程,完善系统整体稳定性,确保对 VSG 输出的有功功率振荡具有优化的调节效果。同理惯性阻尼协同自适应控制策略能够响应整个电网范围内的扰动,这种全局视角有助于

更全面地理解和应对电网的动态变化。在电网发生扰动时,如负载的突然增加或减少,控制策略会自动调整频率,以维持电网的稳定运行。通过精细的控制,策略可以减少系统对扰动的过度反应,即所谓的“超调”现象。这有助于避免不必要的振荡和系统不稳定。控制策略优化了系统的动态响应,使其能够更快地从扰动中恢复并达到新的稳定状态。通过自适应调整,控制策略改善了系统对频率变化的整体响应,使其更加平滑和可预测。控制策略提高了电网在面对各种扰动时的频率稳定性,这对于保障电网的可靠性和电能质量至关重要。除了对频率的调节外,控制策略还对 VSG 输出的有功功率振荡进行了优化。这意味着 VSG 能够更有效地管理其功率输出,减少功率波动,提高电网的整体稳定性。能够根据实时数据和电网状态的变化自动调整控制参数,实现更加灵活和精准的控制。

5 结论

分布式电源的间歇性和不可预测性可能会对电网的频率和电压稳定性造成影响。通过控制逆变器模拟同步发电机的惯性和阻尼特性,VSG 技术为电网提供类似传统发电机的动态响应。同时提高了系统的稳定性,尤其是在分布式电源大量接入的情况下,VSG 提供必要的频率支撑和电压支撑,从而改善微电网的整体性能。本文通过仿真研究,验证了所提出的惯性阻尼协同自适应控制策略的有效性。这种策略能够根据电网的实时需求动态调整 VSG 的控制参数,以应对负载的突然变化或分布式电源的波动。通过精细的控制,策略减少系统对扰动的过度反应,即频率超调现象,从而避免不必要的振荡。改善了系统对频率变化的整体响应,使其更加平滑和可预测。在负载功率突然增加或减少的情况下,控制策略能够提高电网的频率稳定性,保障电力供应的连续性和可靠性。

基金项目:沈阳市科技计划项目(22-322-3-29)。

[参考文献]

- [1]刘国伟,辛立胜,邓浩,等.基于虚拟同步发电机的光伏并网控制技术[J].中国高新科技.2024(8):29-31.
 - [2]杨红品,袁至,王维庆,等.虚拟同步发电机技术控制的 MMC 型固态变压器[J].太阳能学报.2022,43(9):478-487.
 - [3]张祥宇,沈文奇,林毅,等.同步耦合双馈风机的虚拟惯量优化控制技术[J].电网与清洁能源.2022,38(9):126-133.
 - [4]吕文科,张兰红,车三宏.虚拟同步发电机技术在风力发电中的应用[J].自动化仪表.2021,42(8):99-105.
 - [5]许泽阳.储能逆变器虚拟同步发电技术研究[J].电器与能效管理技术.2019(23):65-69.
- 姓名:高庆瑜(1996.5—),毕业于沈阳工程学院,测控技术与仪器专业,就职于丹东金山热电有限公司,点检员,助理工程师。