

平衡频率与功率振荡的虚拟同步机 惯量阻尼参数优化控制

袁 敞, 王俊杰, 胡嘉琦, 刘清新

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 虚拟同步机为系统提供了惯量与阻尼支撑, 但同时会带来类似传统同步发电机的频率和功率振荡问题。频率的振荡伴随着有功功率的振荡, 现有虚拟同步机(VSG)控制方法大多着眼于提高系统频率稳定性, 而忽略了功率振荡的问题。为此, 提出一种虚拟同步机惯量阻尼参数优化控制策略, 以频率偏差和有功功率偏差平方和最小为目标函数, 采用遗传算法对新构建的目标函数进行最小值寻优; 结合具体算例验证优化方法, 建立孤网运行的双机并联的虚拟同步机系统模型。基于此模型, 采用PSCAD时域仿真对分析和提出的优化方法进行验证, 达到频率和输出有功功率振荡平衡、系统具有更好的频率和功率振荡的目的。

关 键 词: 虚拟同步机; 频率振荡; 功率振荡; 惯量阻尼; 优化控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.002 中图分类号: TM761 文章编号: 1673-9140(2023)04-0015-09

Optimal control of inertia damping parameters of virtual synchronous machine with balance frequency and power oscillation

YUAN Chang, WANG Junjie, HU Jiaqi, LIU Qingxin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Virtual synchronous machine provides inertia and damping support for power systems, but at the same time, it will bring the similar problems of frequency and power oscillation as traditional synchronous generators. The oscillation of frequency is accompanied by the oscillation of active power. Most of existing virtual synchronous machine control methods focus on improving the system frequency stability, ignoring the power oscillation. Therefore, an optimal control strategy of inertia damping parameters of virtual synchronous machine is proposed. Taking the minimum sum of squares of frequency deviation and active power deviation as the objective function, the genetic algorithm is used to explore the minimum value of the newly constructed objective function. This optimization method is then verified by a specific test model. Based on this time-domain simulation model in PSCAD, the proposed method can therefore be validated. The capability to balance the frequency oscillation and output active power oscillation will make the system frequency oscillation and power oscillation enhanced.

Key words: virtual synchronous machine; frequency oscillation; power oscillation; inertia damping; optimize control

收稿日期: 2022-08-09; 修回日期: 2022-11-07

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2601402); 国家自然科学基金(51877081)

通信作者: 袁 敞(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事新型功率变换电路和控制方法及其在电力系统的应用研究; E-mail: wjj707013079@163.com

为实现最新提出的“双碳”目标,推进新能源替代传统化石燃料,以新能源为主体的分布式电源越来越受到关注^[1]。分布式电源通常是利用并网逆变器作为桥梁连接电网,相对于传统同步发电机,并网逆变器具有缺少惯性和阻尼等缺点。为解决上述问题,虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)常被用于逆变器的控制^[2-4]。VSG通常以传统电机的数学模型为核心,利用逆变器模拟传统同步电机,能够像传统同步机一样为电网提供惯量和阻尼^[5-7],但虚拟惯量和阻尼的引入会带来类似传统同步发电机的频率和功率振荡问题^[8]。

在设置虚拟惯量和阻尼系数时,频率与有功功率振荡间存在冲突^[9]。惯量越大有功功率波动幅度越大,恢复到稳态所需时间越长,但频率变化较慢;惯量越小有功功率波动幅度越小,恢复到稳态所需时间越短,频率变化较快。阻尼与频率偏移成反比,与功率振荡也有关。虚拟惯量和阻尼可以参与系统的频率调节,改善电网的频率响应特性,频率的变化能够自动调节输出有功功率^[10]。

国内外学者提出了许多抑制频率振荡的方法,如自适应惯量控制方法、Bang-Bang 惯量控制方法等。日本的 Toshifumi Ise 教授将 VSG 应用于分布式发电机组逆变器,在此基础上提出 Bang-Bang 控制方法^[11]。而自适应惯量控制方法是在固定阻尼条件下,根据频率偏差及频率变化率来实时控制惯量的变化^[12-13]。除此之外,也出现了一些其他控制惯量的方法^[14]。在上述方法中,仅研究了虚拟惯量对频率振荡的影响,没有考虑惯量和阻尼系数的参数协调控制对频率和功率振荡的影响^[15]。

近年来,许多学者将惯量和阻尼这2个参数共同作为系统振荡的影响因子进一步进行研究,出现了许多新的方法。惯量、阻尼交替控制方法在引入惯量的同时也引入了阻尼^[16],这种方法的惯量、阻尼不能在同一维度变化控制,且对系统功率振荡的影响是未知的。文献[17-20]通过构建不同的目标函数,采用不同的优化算法,对惯量、阻尼进行了优化,但是没有将有功功率稳定性考虑在内。上述方法主要针对惯量和阻尼对频率、电压的影响进行分析,对输出有功功率的影响研究较少。因此,对于扰动情况下惯量和阻尼对系统频率、功率振荡的影响及其控制还需深入研究。

为了平衡频率和输出有功功率振荡,本文提出一种以频率偏差和有功功率偏差平方和最小为目标 VSG 惯量和阻尼系数的参数优化控制方法。该方法首先基于功角特性方程获得有功功率与频率偏差的关系,结合同步发电机的转子运动方程,得到频率偏差、惯量 J 与阻尼系数 D 的关系式,最后得到用 J, D 表示的目标函数。本文构建双机并网的系统模型,对虚拟惯量和阻尼进行参数优化控制,达到平衡系统和有功功率振荡的目的;采用遗传算法(genetic algorithm, GA)对新构建的目标函数进行最小值寻优,结合具体算例验证优化方法。最后,采用 PSCAD 时域仿真对本文分析和提出的优化方法进行验证。

1 虚拟同步机拓扑结构与运行机理

1.1 虚拟同步机等效模型

VSG 本质上是通过逆变器实现模拟传统同步机,典型的 VSG 拓扑结构及等效关系如图 1 所示。

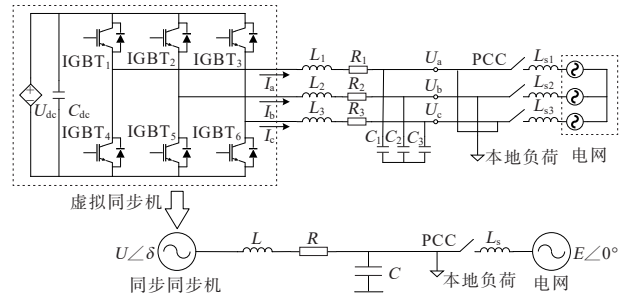


图 1 虚拟同步机

Figure 1 Configuration of a VSG

图 1 中 U, E 分别为 VSG 输出侧、电网侧的电压幅值, δ 为 U, E 间的相位差。通常线路阻抗被认为是感性的,电阻可以忽略,用 X 表示电抗。通过计算功率公式可得:

$$S = P + jQ = \frac{EU}{X} \sin \delta + j \frac{UE \cos \delta - E^2}{X} \quad (1)$$

对式(1)中有功功率 P 进行分析,由于 δ 角度通常很小,可认为 $\sin \delta \approx \delta$,得到 VSG 电磁功率为

$$P_e = \frac{EU}{X} \sin \delta \approx \frac{EU}{X} \delta = K\delta \quad (2)$$

δ 与角频率 ω 的关系式为

$$\delta = \int (\omega - \omega_g) dt \quad (3)$$

式中, ω_g 为网侧角频率。

将式(3)代入式(2),可得VSG功角特性方程:

$$P_e = K \int (\omega - \omega_g) dt = K \int \Delta\omega dt \quad (4)$$

由式(4)可知,输出有功功率可用频率偏差表示,而频率偏差可由转子运动方程中惯量和阻尼表示,便于后续代入目标函数进行最优值寻优。

1.2 虚拟同步机并联系统模型

为研究电网中多虚拟同步机的情形,本文采用双机并联系统,如图2所示,2台VSG分别位于传输线路两侧,通过功率传输方向确定送端与受端,送端与电网相连,受端与负载相连;两端的虚拟同步机组通过双回线路连接。系统具体结构如图3所示,为了简化系统,2台虚拟同步机参数保持一致。VSG既可并网运行也可孤网运行,本文采用双机并联孤网运行的方式,负载侧为1 MW。

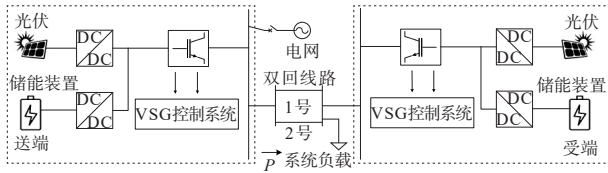


图2 双机并联系统

Figure 2 Diagram of a double machine parallel system

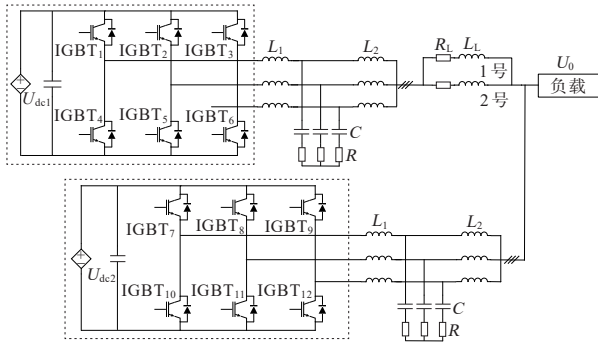


图3 双机并联结构

Figure 3 Structure of a double machine parallel system

1.3 虚拟同步机控制模型

VSG有功一频率控制基于同步发电机转子运动方程、一次调频方程,分别为

$$J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - \omega_g) \quad (5)$$

$$P_m - P_{ref} = \frac{1}{m} (\omega_{ref} - \omega_g) \quad (6)$$

式(5)、(6)中, P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率, $P_e = P_{out}$, P_{out} 为VSG输出有功功率; ω 为VSG角频率; ω_g

为网侧角频率; P_{ref} 为系统参考功率; m 为调频系数; ω_{ref} 为设置的参考角速度。

将式(6)、 $P_e = P_{out}$ 代入式(5)可得:

$$J \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} + \frac{1}{m} (\omega_{ref} - \omega_g) - P_{out} - D(\omega - \omega_g) \quad (7)$$

通过式(7)得到有功一频率下垂控制,其控制框图如图4所示。

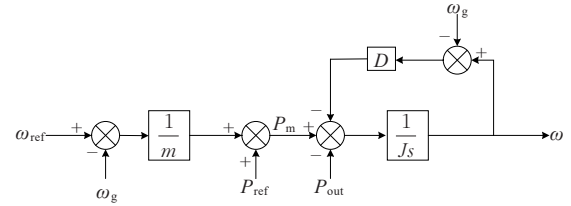


图4 有功一频率控制框图

Figure 4 Active frequency control block diagram

系统的电压是通过无功一电压控制来实现的,其模仿传统同步电机的励磁调节功能,以实现无功功率跟踪和电压幅值的下垂特性^[21]。无功一电压控制控制框图如图5所示。

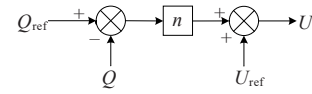


图5 无功一电压控制框图

Figure 5 Reactive voltage control block diagram

输出电压 U 的表达式为

$$U = U_{ref} + n(Q_{ref} - Q) \quad (8)$$

式中, U_{ref} 为系统参考电压值; n 为无功一电压控制下垂系数; Q_{ref} 为系统参考无功功率; Q 为系统输出无功功率。

采用图4、5所示的2种控制分别对电压和相角进行控制,得到系统的频率角 θ 与电压 U ; 随后采用双环控制方法进行控制,将得到的 θ 和 U 输出到 abc 坐标系; 最后将输出波形与三角波通过PWM控制器得到输出信号,输出信号控制6个IGBT元件,实现逆变器控制。

2 系统动态特性分析

当系统受到扰动时(如三相短路),通过频率、功率动态特性指标来衡量系统频率和功率的动态

特性^[22],如图6所示。

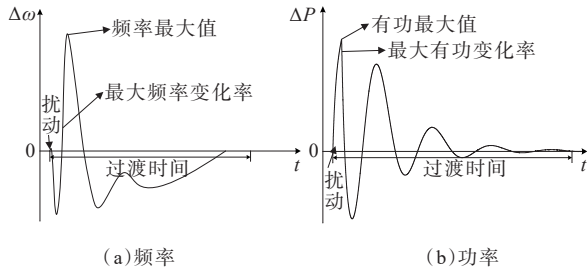


图6 频率动态特性指标

Figure 6 Frequency and power dynamic characteristic index

最大频率(功率)变化率:在数学意义上为频率(功率)的最大导数,在物理意义上为频率(功率)变化的最大速度。其表达式如下:

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{\max} = \max_{t \geq 0} |\dot{\omega}(t)| \quad (9)$$

$$\left. \frac{dP}{dt} \right|_{\max} = \max_{t \geq 0} |\dot{P}(t)| \quad (10)$$

式(9)、(10)中, $\dot{\omega}(t)$ 为随时间变化的频率变化率; $\dot{P}(t)$ 为随时间变化的有功变化率; \max 为最大值。

频率(功率)最大值:振荡的最大点,表示此刻振荡振幅最大。其表达式如下:

$$\Delta\omega_{\max} = \max |\omega(t) - \omega_0| \quad (11)$$

$$\Delta P_{\max} = \max |P(t) - P_0| \quad (12)$$

式(11)、(12)中, $\omega(t)$ 为随时间变化的频率; ω_0 为参考频率; $P(t)$ 为随时间变化的有功功率; P_0 为参考功率。

过渡时间:频率(功率)从发生扰动到恢复稳态值±5%的范围且不再越出所需时间。其表达式为

$$T_{\omega} = t \Big|_{\Delta\omega \leq C_1} \quad (13)$$

$$T_P = t \Big|_{\Delta P \leq C_2} \quad (14)$$

系统频率振荡表征VSG对系统的支撑作用,有功振荡表征VSG运行时的电压电流应力,影响装置运行安全性。频率和有功振荡其中任意一种振荡过大,轻则造成各设备无法在额定工况下工作、系统保护误动作,严重则造成系统失稳崩溃。在装置安全稳定运行的前提下,本文探讨优化VSG对系统的支撑作用,因此,需要平衡频率和有功功率振荡。

3 虚拟同步机参数优化控制方法

VSG的频率和有功功率振荡间存在矛盾。由

转子运动方程式(5)可知,惯量 J 的取值不仅会影响 $d\omega/dt$ 的大小,也会影响有功功率的振荡^[23]。惯量 J 越大, $d\omega/dt$ 越小,而 ΔP 越大,相反亦然;阻尼系数 D 也会影响频率、功率的振荡^[24]。

当VSG系统并网运行受到扰动时,系统频率和输出有功功率会同时发生振荡。在发生振荡时,为了更好地平衡频率和输出有功功率振荡,本文提出一种以频率偏差和有功功率偏差平方和最小为目标的VSG惯量和阻尼系数的参数优化控制方法。

3.1 目标函数

如图7所示,当频率、有功功率振荡时,阴影面积的大小分别为系统相位、能量不平衡的大小,因此,以频率偏差和有功功率偏差平方和最小为目标构建目标函数。目标函数中各频率、功率变量均采用标么值表示,不存在量纲不相同的问题。

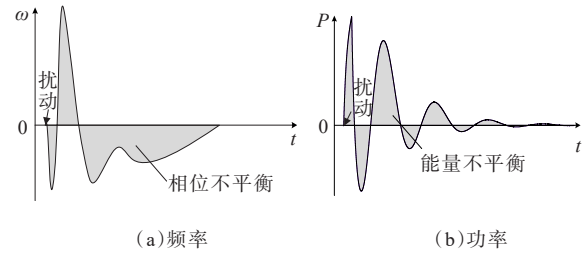


图7 频率、功率响应

Figure 7 Frequency and power response

构建的目标函数如下:

$$\begin{cases} \text{obj. min } C \\ C = \int_0^t \left[Q \sum_i (\omega_i - \omega_g)^2 + R \sum_i (P_i - P_{\text{ref}})^2 \right] dt \end{cases} \quad (15)$$

式中, i 为VSG的个数; ω_i 为第 i 台VSG的角频率; P_i 为第 i 台VSG的有功功率; ω_{ref} 为第 i 台VSG的参考角频率; P_{ref} 为第 i 台VSG的参考有功功率; Q 、 R 为加权系数。

加权系数是在优化过程中选取的主要矛盾,考虑的问题不同,加权系数的选取则不同。当对频率振荡抑制进行研究时,将频率偏差的加权系数设置为较大值,功率偏差加权系数设置为较小值;反之亦然。式(15)中的第1部分用于限制动态调节过程中的频率振荡,第2部分用于限制输出有功功率的振荡。依据研究中频率和有功振荡影响所占权重

设置 Q, R , 频率变化1%时有功功率变化100%, 视频率和有功功率同等重要。为使频率变化1%时对应有功功率也只变化1%, 因此设置 Q 为 $1/m^2$ 、 R 为1。采用频率和功率偏差平方和的形式可以避免积分中出现负数的情况。

3.2 约束条件

在电网的不同场景中, VSG的虚拟惯量和虚拟阻尼不是随意取值的, 惯量过大或阻尼过小都会造成系统失稳而引发严重的后果。为使系统能够稳定运行, 建立约束条件如下:

$$\begin{cases} J_{\min} \leq J_i \leq J_{\max} \\ D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中, J_i, D_i 分别为第 i 台VSG的虚拟惯量、虚拟阻尼; J_{\min}, J_{\max} 分别为稳定边界的惯量下限、上限; D_{\min}, D_{\max} 分别为稳定边界的阻尼系数下限、上限。

通过对虚拟惯量和阻尼系数对系统稳定的影响分析^[18], 能够得到使系统稳定运行的惯量及阻尼取值范围, 并作为约束条件结合目标函数加入到优化模型中。

3.3 优化控制方法

由式(6)有功—频率控制部分可得机械功率表达式(忽略调频控制部分, 即下垂部分):

$$P_m = P_{\text{ref}} \quad (17)$$

将式(4)、(17)代入转子运动方程式(5), 可得:

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_{\text{ref}} - K \int \Delta\omega dt - D\Delta\omega \quad (18)$$

由式(18)可得频率偏差与虚拟惯量 J 及阻尼系数 D 的关系式, 对该式进行变换求解, 可用 J, D 表示频率偏差 $\Delta\omega$ 。

不同系统不同场景要求输出有功功率稳态值不同, P_{ref} 根据不同取值也不同, 代入不同的 P_{ref} , 通过计算得到最优值, 不会影响最终的优化结果。根据系统要求选择合适的 P_{ref} , 本文采用的双机并联系统将1 MW的负载平均分配给2台VSG, 令 $\int \Delta\omega dt = y, P_{\text{ref}} = 0.5$, 求解方程:

$$Jy'' + Dy' + Ky = 0.5 \quad (19)$$

由式(19)可知, 此类方程需分情况讨论得到通解。首先考虑VSG初始启动状态, 输出有功功率为零, 即 $P_m = P_e = 0, \omega_m = \omega_g$, 初始条件为

$$\begin{cases} \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = 0 \\ y|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

1) 当 $D^2 > 4KJ$ 时, 特征方程有2个不等实根, 通解如下:

$$y = C_1 e^{-\frac{(D-\sqrt{D^2-4KJ})t}{2J}} + C_2 e^{-\frac{(D+\sqrt{D^2-4KJ})t}{2J}} + \frac{1}{2K} \quad (21)$$

其中, C_1, C_2 为任意常数, 具体取值视初始条件决定, 代入初始条件可得:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{D-\sqrt{D^2-4KJ}}{4K\sqrt{D^2-4KJ}} - \frac{1}{2K} \\ C_2 = \frac{D-\sqrt{D^2-4KJ}}{4K\sqrt{D^2-4KJ}} \end{cases} \quad (22)$$

将 C_1, C_2 代入式(21)可得:

$$y = \left(-\frac{D-\sqrt{D^2-4KJ}}{4K\sqrt{D^2-4KJ}} - \frac{1}{2K} \right) e^{-\frac{(D-\sqrt{D^2-4KJ})t}{2J}} + \frac{D-\sqrt{D^2-4KJ}}{4K\sqrt{D^2-4KJ}} e^{-\frac{(D+\sqrt{D^2-4KJ})t}{2J}} + \frac{1}{2K} \quad (23)$$

2) 当 $D^2 = 4KJ$ 时, 特征方程有2个相等实根, 通解如下:

$$y = (C_1 + C_2 t) e^{-\frac{Dt}{2J}} + \frac{1}{2K} \quad (24)$$

代入初始条件可得:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{1}{2K} \\ C_2 = -\frac{D}{4KJ} \end{cases} \quad (25)$$

将 C_1, C_2 代入式(21)可得:

$$y = \left(-\frac{1}{2K} - \frac{Dt}{4KJ} \right) e^{-\frac{Dt}{2J}} + \frac{1}{2K} \quad (26)$$

3) 当 $D^2 < 4KJ$ 时, 特征方程有一对共轭复根, 通解如下:

$$y = e^{-\frac{Dt}{2J}} \left(-\frac{1}{2K} \cos \frac{\sqrt{4KJ-D^2}t}{2J} - \frac{D}{2K\sqrt{4KJ-D^2}} \sin \frac{\sqrt{4KJ-D^2}t}{2J} \right) + \frac{1}{2K} \quad (27)$$

代入初始条件可得:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{1}{2K} \\ C_2 = -\frac{D}{2K\sqrt{4KJ-D^2}} \end{cases} \quad (28)$$

将 C_1 、 C_2 代入式(21)可得:

$$y = e^{-\frac{Dt}{2J}} \left(-\frac{1}{2K} \cos \frac{\sqrt{4KJ - D^2} t}{2J} - \frac{D}{2K\sqrt{4KJ - D^2}} \sin \frac{\sqrt{4KJ - D^2} t}{2J} \right) + \frac{1}{2K} \quad (29)$$

不同系统具有不同的 K 值,通过式(2)不同稳态下的 U 、 E 计算系统的 K 值。将方程求解得到的结果分别代入目标函数,可以得到3种情况下采用惯量 J 、阻尼系数 D 表示的目标函数。本文双机并联系统求得 $K = 15.8$, 当 $D^2 > 4KJ$ 、 $D^2 = 4KJ$ 、 $D^2 < 4KJ$ 时,目标函数表达式分别如下:

$$C = \int \left\{ \left[\left(-\frac{D - \sqrt{D^2 - 63.2J}}{4\sqrt{D^2 - 63.2J}} - 0.5 \right) e^{-\frac{(D - \sqrt{D^2 - 63.2J})t}{2J}} + \frac{D - \sqrt{D^2 - 63.2J}}{4\sqrt{D^2 - 63.2J}} e^{-\frac{(D + \sqrt{D^2 - 63.2J})t}{2J}} \right]^2 + \left[\frac{e^{-\frac{(D - \sqrt{D^2 - 63.2J})t}{2J}} - e^{-\frac{(D + \sqrt{D^2 - 63.2J})t}{2J}}}{2\sqrt{D^2 - 63.2J}} \right]^2 \right\} dt \quad (30)$$

$$C = \int \left\{ \left[\left(-0.5 - \frac{Dt}{4J} \right) e^{-\frac{Dt}{2J}} \right]^2 + \left[\frac{D^2 t e^{-\frac{Dt}{2J}}}{126.4J^2} \right]^2 \right\} dt \quad (31)$$

$$C = \int \left\{ \left[e^{-\frac{Dt}{2J}} \left(-0.5 \cos \frac{\sqrt{63.2J - D^2} t}{2J} - \frac{D \sin \frac{\sqrt{63.2J - D^2} t}{2J}}{2\sqrt{63.2J - D^2}} \right) \right]^2 + \left[\frac{\sin \left(\frac{\sqrt{63.2J - D^2} t}{2J} \right) e^{-\frac{Dt}{2J}}}{\sqrt{63.2J - D^2}} \right]^2 \right\} dt \quad (32)$$

将3种情况下的目标函数进行最小值寻优,比较三者目标函数的大小,选取目标函数最小的点即为全局最优值点。最后,在PSCAD仿真软件中对参数优化后的最优值代入验证。

为了实现本文的优化目标,本文选择采用一种基于遗传算法的参数优化控制策略,用离线样本来得到参数优化结果,再实时地应用。优化设计流程如图8所示。

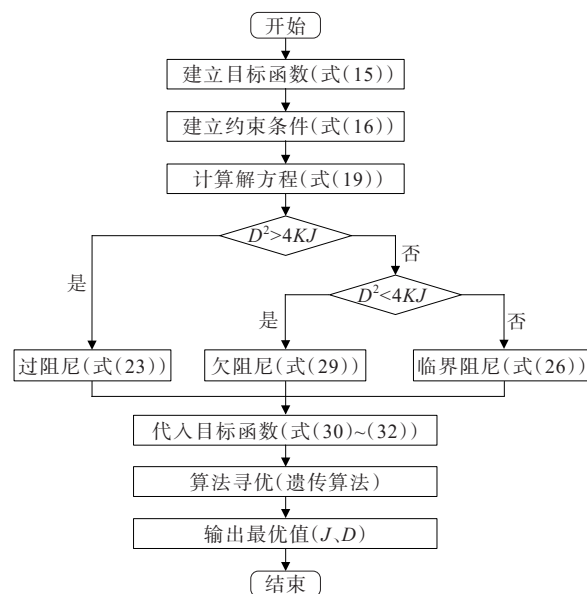


图8 优化设计流程

Figure 8 Optimal design process

相比于其他传统算法,遗传算法可以借助“变异”步骤有效避免寻优结果陷入局部最优,易于得到全局最优解,适用于本文优化问题。采用Matlab的PlatEMO平台中的遗传算法对目标函数进行最小值寻优,最终输出最优解。

4 仿真实验

在Matlab中采用遗传算法,根据流程进行寻优后得到最优值。将 J 、 D 的最优值代入PSCAD仿真软件中进行时域仿真。

将过阻尼 $D^2 > 4KJ$ 、临界阻尼 $D^2 = 4KJ$ 、欠阻尼 $D^2 < 4KJ$ 这三种情形下的目标函数在Matlab中以函数情形呈现出,在PlatEMO平台中调用遗传算法,分别对3种情况下的目标函数进行寻优。过阻尼情况下最优值为 $J = 0.31$ 、 $D = 80.34$;临界阻尼情况下最优值为 $J = 11.23$ 、 $D = 26.66$;欠阻尼情况下最优值为 $J = 1.68$ 、 $D = 9.26$ 。通过比较得出,过阻尼情形下得到的最优值对应的目标函数值最小。在Matlab中绘制目标函数 C 的三维立体,如图9所示。

将遗传算法的寻优路径绘制在等高线上,如图10所示,采用虚线绘制出参数优化控制方法的约束条件,在过阻尼的情形下,为了使系统能够稳定运行,惯量 J 、阻尼系数 D 需满足 $0 < J < 300$ 、 $80 < D < 500$ 的约束条件;圆点为寻优过程中不同迭代次数

的迭代点,五角星为最优值对应的点,最优值为 $J=0.31, D=80.34$ 。在 $D=125$ 附近的迭代点有一个偏离最优值的上升趋势,这是遗传算法中避免陷入局部最优,得到全局最优的“变异”措施。

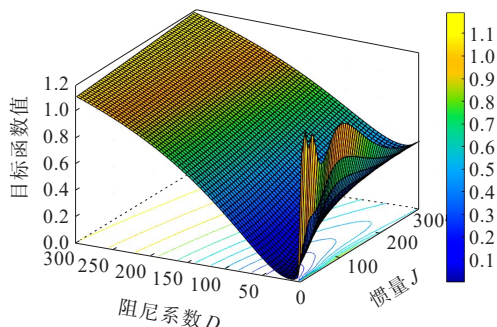


图 9 目标函数 C 三维立体

Figure 9 Objective function C 3D stereogram

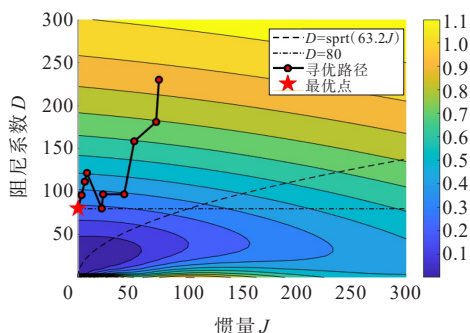


图 10 等高线寻优路径示意

Figure 10 Contour optimization path

观察图 9、10 可知,在惯量阻尼约束范围内,目标函数最终收敛至约束范围内的最小等高线上,该优化模型最终收敛。

在 PSCAD 中建立 VSG 双机并网模型。为了简化系统,2 台 VSG 参数设置相同,VSG 之间 J, D 无关联。系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameter

$U_{dc1}/$ kV	$S_B/$ (MV·A)	$P_{ref1}/$ MW	$L_1/$ mH	$R/$ Ω	$R_L/$ Ω	$\omega_{ref}/$ (rad/s)
2.5	1	0.5	1.02	3.63	0.161	314
$U_{dc2}/$ kV	$U_0/$ kV	$P_{ref2}/$ MW	$L_2/$ mH	$C/$ μF	$L_L/$ mH	$P_{load}/$ MW
2.5	1	0.5	0.25	10.11	0.6	1

表 1 中 U_{dc1}, U_{dc2} 分别为 2 台 VSG 左侧直流电源电压,采用直流电压源代替; S_B 为 VSG 参考容量, U_0 为负载电压; P_{ref1}, P_{ref2} 分别为送端、受端 VSG 参考输出有功功率; ω_{ref} 为系统参考角频率。本文采

用孤网运行的方式,负载侧为 1 MW, P_{load} 为负载侧功率。为获得更清晰、准确的波形,仿真时间设为 10 s,步长设为 15 μs 。

由于 VSG 的启动阶段其响应特性和稳态时不同,因此,本文不研究启动阶段频率、功率的波动,主要研究 VSG 稳态遭受扰动时频率与功率的振荡。在仿真 5 s 时,模拟系统在双回路 2 号线上发生三相短路故障并迅速切除,仿真中观察去除启动阶段后的波形,即 2~10 s 的波形变化。

本系统在临界阻尼状态和欠阻尼状态下运行时,系统频率和功率失稳且恢复不到稳态,过阻尼状态下运行能达到最优。将本文方法与优化前的固定惯量控制方法进行对比分析,分别对本文方法与优化前的固定惯量控制方法的有功功率 P 、角频率 ω 、目标函数 C 进行比较。

2 台 VSG 输出的有功功率波形分别如图 11 所示,当采用固定惯量控制方法时,输出有功功率振荡幅度大,至少需要 3 s 才能达到稳定参考值,表明该控制策略的动态响应非常缓慢,存储单元的吸收能量最大。对于所提出的惯量阻尼参数优化控制策略,输出有功功率振荡幅度小,仅需 2 s 即可达到有功功率的稳定参考值,相应的功率和存储单元的容量较小。

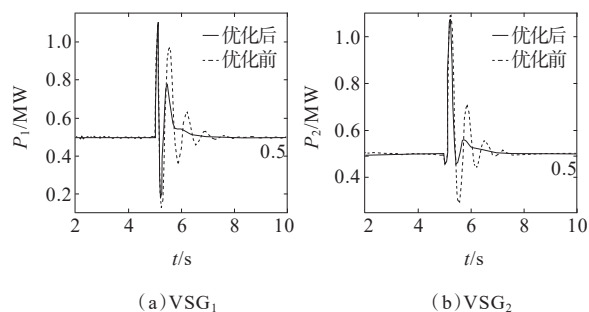


图 11 VSG₁、VSG₂ 有功功率波形

Figure 11 VSG₁ and VSG₂ active power waveform

频率波形如图 12 所示;为了能够更明显观察发生扰动时角频率的波动,将 3.5~7.5 s 时的波形放大,如图 13 所示,固定惯量控制方法的超调量较小,但达到稳态所需的时间较长。当采用本文所提出的惯量阻尼参数优化控制策略时,超调量较大,但是系统能快速达到稳态。输出的目标函数 C 波形如图 14 所示,本文提出与固定惯量的方法相比能够实现目标函数 C 的最小化,更好地抑制了系统的功率和频率振荡。

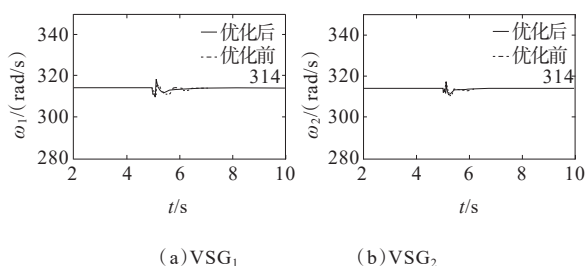


图 12 VSG₁、VSG₂角频率波形

Figure 12 VSG₁ and VSG₂ angular frequency waveform

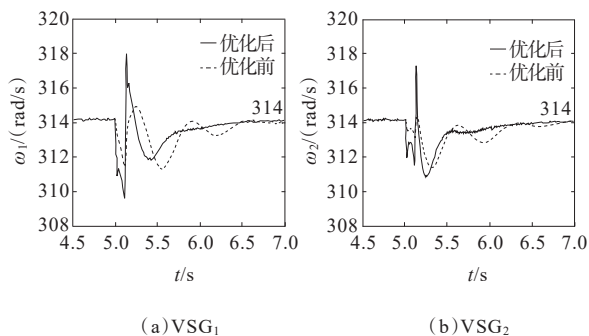


图 13 VSG₁、VSG₂发生扰动时角频率波形

Figure 13 VSG₁ and VSG₂ angular frequency waveform in a case of disturbance

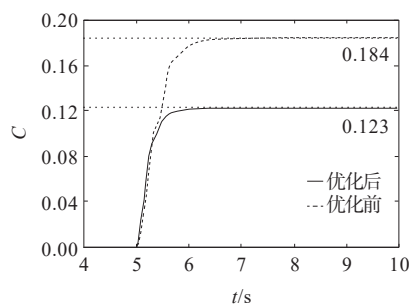


图 14 目标函数 C 波形

Figure 14 Objective function C waveform

综上所述,本文提出的惯量阻尼参数优化控制策略采用了惯量与阻尼系数的参数协调控制方法,实现了对参数的优化控制,该策略能够更好地平衡系统的频率振荡和输出有功功率振荡。

5 结语

为了平衡好系统的频率和输出有功功率振荡,本文综合考虑惯量和阻尼对系统振荡的影响,通过功角方程和转子运动方程的推导,提出了一种以频率偏差和有功功率偏差平方和最小为目标的VSG惯量阻尼参数优化控制方法。通过对惯量 J 、阻尼系

数 D 的优化控制,使系统能够更好地抑制频率和有功功率振荡,达到平衡系统频率和功率振荡的目的。

参考文献:

- [1] 文劲宇,周博,魏利岫.中国未来电力系统储电网初探[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):1-10.
WEN Jinyu,ZHOU Bo,WEI Lishen.Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J].Power System Protection and Control,2022,50(7):1-10.
- [2] SAKIMOTO K,MIURA Y,ISE T.Stabilization of a power system with a distributed generator by a virtual synchronous generator function[C]//IEEE 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia,Jeju,South Korea,2011.
- [3] 李永刚,贺梦娟,刘静利,等.考虑风速影响的双馈风机调频建模及稳定性分析[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(9):110-120.
LI Yonggang,HE Mengjuan,LIU Jingli,et al.Frequency modulation modeling and stability analysis of DFIG-based wind turbines considering the influence of wind speed[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2022,34(9):110-120.
- [4] ISE T,MIURA Y,UOK S,et al.Virtual synchronous generators:a survey and new perspectives[J].International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2014,54:244-254.
- [5] 李昊,王杰.基于虚拟同步发电机技术的改进微网下垂控制[J].电力科学与技术学报,2018,33(2):11-19.
LI Hao,WANG Jie.Modified droop control based on virtual synchronous generator [J].Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(2):11-19.
- [6] 孙亮,杨晓飞,孙立国,等.基于改进虚拟同步发电机的多逆变器频率无差控制策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(11):18-27.
SUN Liang,YANG Xiaofei,SUN Liguang,et al.A frequency zero difference control strategy for multiple inverters based on improved virtual synchronous generators[J].Power System Protection and Control,2021,49(11):18-27.
- [7] 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(2):336-349.
ZHONG Qingchang.Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J].Proceedings of the CSEE,2017,37(2):336-349.
- [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(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.
- [10] 占伟强,吴振兴,邢鹏翔,等.虚拟同步发电机及其在独立型微电网中的应用[J].电机与控制应用,2017,44(4):14-19+27.
ZHAN Weiqiang, WU Zhenxing, XING Pengxiang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in independent microgrid[J]. Electric Machines and Control Application, 2017,44(4):14-19+27.
- [11] 耿龙海,李朝霞,权学政.基于PSASP的含大规模光伏发电系统暂态稳定仿真分析[J].电网与清洁能源, 2021,37(2):124-131.
GENG Longhai, LI Zhaoxia, QUAN Xuezheng. Transient stability simulation analysis of the power generation system containing large-scaled photovoltaic based on PSASP[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2): 124-131.
- [12] 兰征,刁伟业,曾进辉,等.含异构微源孤岛微电网内虚拟同步发电机预同步控制策略[J].电力系统自动化, 2022,46(19):154-161.
LAN Zheng, DIAO Weiye, ZENG Jinhui, et al. Pre-synchronization control strategy of virtual synchronous generator in isolated microgrid with heterogeneous distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(19):154-161.
- [13] 朱作滨,张常友,曾小斌.基于自适应旋转惯量VSG控制策略光储微网系统[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(3):67-72.
ZHU Zuobin, ZHANG Changyou, ZENG Xiaobin. Photovoltaic energy storage microgrid system based on adaptive rotating inertia VSG control strategy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021,33(3):67-72.
- [14] 张军六,李佳朋,唐震,等.基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):50-60.
ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(3):50-60.
- [15] POOLL B K, BOLOGNANI S, LI N, et al. A market mechanism for virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020,11(4):3570-3579.
- [16] 李广浩,彭克,张新慧,等.直流配电系统接口换流器虚拟同步发电机自适应惯性控制策略[J].电测与仪表, 2021,58(9):135-141.
LI Guanghao, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Adaptive inertia control strategy of virtual synchronous generator of DC power distribution system interface converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 135-141.
- [17] ZHANG X, MAO F B, XU H Z, et al. An optimal coordination control strategy of micro-grid inverter and energy storage based on variable virtual inertia and damping of VSG[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017,3(3):25-33.
- [18] 王淋,巨云涛,吴文传,等.面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J].中国电机工程学报,2021,41(13):4479-4490.
WANG Lin, JU Yuntao, WU Wenchuan, et al. Optimal design of inertia and damping parameters of virtual synchronous microgrid for improving frequency stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(13):4479-4490.
- [19] 王枫淇,叶鹏,刘思奇,等.基于天牛群算法的虚拟同步发电机最优控制策略研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2021,17(4):39-45.
WANG Fengqi, YE Peng, LIU Siqi, et al. Study on optimal control strategy of virtual synchronous generator based on longhorn swarm algorithm[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering(Natural Science), 2021,17(4):39-45.
- [20] 杨继鑫,王久和,王勉,等.基于无源控制的光储直流微网虚拟惯性控制策略研究[J].发电技术, 2021,42(5):576-584.
YANG Jixin, WANG Jiuhe, WANG Mian, et al. Research on virtual inertial control strategy of DC microgrid with photovoltaic and storage system based on passivity-based control[J]. Power Generation Technology, 2021,42(5): 576-584.
- [21] 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.

- (1):163-169.
- [16] 刘道伟,章锐,李柏青,等.基于状态量测的电网拓扑结构反向识别方法研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7107-7117.
LIU Daowei,ZHANG Rui,LI Baiqing,et al. Research on reverse recognition method of power system topological structure based on state measurement[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(24):7107-7117.
- [17] YU J, WENG Y, RAJAGOPAL R. PaToPaEM: A data-driven parameter and topology joint estimation framework for time-varying system in distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(3): 1682-1692.
- [18] 王贺飞,李洪涛,余昆,等.基于DSCADA和 μ PMU数据融合的配电网运行拓扑辨识[J].电力建设,2019,40(6):123-131.
WANG Hefei,LI Hongtao,YU Kun,et al. Identification of distribution network operation topology based on DSCADA and μ PMU telemetry data fusion[J]. Electric power Construction,2019,40(6):123-131.
- [19] WANG X, BIALEK J W, TURITSYN K. PMU-based estimation of dynamic state Jacobian matrix and dynamic system state matrix in ambient conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,33(1):681-690.
- [20] 王献志,李铁成,郭少飞,等.基于 μ PMU电压相位数据的配电网拓扑辨识[J].电网与清洁能源,2022,38(6):54-63.
WANG Xianzhi, LI Tiecheng, GUO Shaofei, et al. Identification of distribution network topology based on μ PMU voltage phase data[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(6):54-63.
- [21] SRINIVAS V L, WU J. Topology and parameter identification of distribution network using smart meter and μ PMU measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2022,71:21762749.
- [22] 杨冬锋,付强,刘晓军,等.配电网动态拓扑与线路参数联合在线辨识方法[J].电力系统自动化,2022,46(2):101-108.
YANG Dongfeng,FU Qiang,LIU Xiaojun,et al. Joint online identification method for dynamic topology and line parameters of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(2):101-108.
- [23] 贾巍,雷才嘉,葛磊蛟,等.城市配电网的国内外发展综述及技术展望[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):158-168.
JIA Wei,LEI Caijia,GE Leijiao,et al. Overview on domestic and international development of urban distribution network and technical prospect[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2020,41(1):158-166.
- [24] 刘宽,王淳,伍惠铨,等.一种含PV节点的配电网线性潮流计算方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(3):17-22.
LIU Kuan, WANG Chun, WU Huicheng, et al. A linear power flow calculation method for distribution networks with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(3):17-22.
- [25] ZHANG J, WANG Y, WENG Y, et al. Topology identification and line parameter estimation for non-PMU distribution network: a numerical method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(5):4440-4453.
- [26] DOROSTKAR-GHAMSARI M R, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M, et al. Value of distribution network reconfiguration in presence of renewable energy resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(3): 1879-1888.

(上接第23页 = Continued from page 23)

- [22] 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.
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(8):89-93.
- [23] 刘欣,郭志博,贾焦心,等.基于序阻抗的虚拟同步发电机并网稳定性分析及虚拟阻抗设计[J].电工技术学报,2023,38(15):4130-4146.
LIU Xin, GUO Zhibo, JIA Jiaoxin, et al. Stability analysis and virtual impedance design of virtual synchronous generator grid connection based on sequence impedance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(15):4130-4146.
- [24] 李欣,刘晨凯,郭攀峰,等.考虑拓扑变化的电力系统暂态稳定评估[J].智慧电力,2021,49(12):59-65.
LI Xin, LIU Chenkai, GUO Panfeng, et al. Transient stability assessment of power system considering change in network topology[J]. Smart Power,2021,49(12):59-65.