

DOI: 10.7667/PSPC161007

基于 NCD 优化的光-火微网频率控制方法研究

莫槟滔¹, 陈 峦¹, 井 实¹, 鲁尔洁¹, 郑 彬², 姚 亮²

(1. 电子科技大学 能源科学与工程学院, 四川 成都 611731;

2. 国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为了提高光-火微电网运行时系统的频率稳定性, 提出了基于优化控制工具箱和优化函数相结合的 NCD(非线性控制设计)改进 PID 控制器, 并加入到光-火微网中调节电网频率。分别建立光伏系统和火力发电机组的数学模型, 将光伏和负荷引起的系统有功变化量作用于火力发电机组, 通过设计 NCD 优化控制策略, 以减少因光伏系统功率输出的不稳定性造成电网频率出现的偏差。通过在 Simulink 中搭建光-火微网模型, 仿真结果及数据分析验证了该方案的可行性。与传统的频率调节相比, 该方法实现系统更快的响应性、更小的超调量和更强的鲁棒性, 减少了光伏并网对电力系统有功平衡造成的扰动。

关键词: NCD 优化; 电网频率; 光伏并网; PID 控制; 仿真模型

Research on frequency control for solar-thermal microgrid based on NCD

MO Bintao¹, CHEN Luan¹, JING Shi¹, LU Erjie¹, ZHENG Bin², YAO Liang²

(1. School of Energy Science and Engineering, UESTC, Chengdu 611731, China;

2. Tianfu Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve the frequency stability of solar-thermal microgrid, this paper puts forward a method by combination of optimization toolbox control and optimization function based on Nonlinear Control Design (NCD) to improve PID control, and applies it to the power system frequency regulation. Mathematical models of photovoltaic systems and thermal power are respectively established, and the total amount of change in the active role of photovoltaic systems and load is applied to the thermal power generating units for reducing the deviation of the power system frequency caused by the instability of PV system, by means of the NCD controller. Based on the solar-thermal microgrid model on Simulink, the simulation and data analysis have verified the effectiveness of the proposed scheme. Compared with the conventional frequency regulation, the proposed scheme achieves faster system response, smaller overshoot and stronger robustness, and reduces the disturbance of the power system active balance caused by the photovoltaic grid-connected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61304177) and Scientific Research Project of Sichuan Education Department (No. 15ZB0345).

Key words: optimization on NCD; grid frequency; photovoltaic grid-connected; PID control; simulation model

0 引言

随着新能源的开发与应用, 光伏发电并网已经成为一种发展趋势并且被广泛应用到电网中。但是光伏系统发电具有间歇性和不稳定性, 这些都会在很大程度上造成电网频率的波动。为了保证电网的

电能质量, 需要将光伏出力作为电网功率跟踪的目标, 实时监测并减小其对电网有功功率的影响, 对电网频率进行有效控制^[1]。为实现这一目标, 本文在 Matlab/Simulink 环境下完成光伏发电系统的仿真^[2], 仿真模块主要包括 4 个部分: 光伏电池仿真模块^[3]、DC-DC 变换器电压转换模块、MPPT 控制模块^[4-6]、PWM 模块。

微网系统的频率稳定是保证电能质量可靠、电网安全必不可少的因素, 而电网频率调节中二次调

基金项目: 国家自然科学基金(61304177); 四川省教育厅科研项目(15ZB0345)

频目前应用最为广泛的就是 AGC 算法。文献[7]针对孤岛运行的微电网受负荷变化影响较大的特点, 提出运用 PI 控制环节来调节微电网频率, 但是由于电网结构体系的复杂性和时变性, 其性能指标和精确度往往不能满足要求。文献[8]则将常规 PID 控制器组成无差调速系统, 自动完成系统二次调频, 但是会因为误差积分反馈的引入产生很多副作用, 并且得到的线性组合不一定是最好的组合方式。而且由于光伏阵列、电力电子变换器和非线性负载等产生的光伏并网发电的非线性行为, 使得传统的线性 PID 控制器难以获得良好的控制效果^[9]。为此, 本文设计了一种基于非线性控制设计 NCD(Nonlinear Control Design)优化的 PID 控制器, 建立光伏发电系统和常规火力机组结合的光-火微网仿真模型, 通过实验对比验证了基于 NCD 的 PID 控制器调频具有良好的控制性能和较强的鲁棒性。

1 光伏发电系统

1.1 光伏电池仿真模块(图 1)

本文研究的光-火微网中光伏电池板数据参数如下: 电池板的短路电流为 $I_{sc} = 8.58 \text{ A}$, 开路电压 $V_{oc} = 22 \text{ V}$, 最大功率点的电流 $I_m = 7.94 \text{ A}$, 电压 $V_m = 17.7 \text{ V}$, 补偿系数 $a = 0.0025$, $b = 0.5$ 。在描述光伏电池等效电路的已有文献基础上^[10-11], 建立仿真模型的数学表达式为

$$K_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp(-\frac{V_m}{K_2 V_{oc}}) \quad (1)$$

$$K_2 = (\frac{V_m}{V_{oc}} - 1) / \ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \quad (2)$$

$$T_1 = T - T_{ref} \quad (3)$$

$$S_1 = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (4)$$

$$D = I_{sc} S_1 + a T_1 (1 + S_1) \quad (5)$$

$$dv = b T_1 + D R_s \quad (6)$$

$$I = I_{sc} \{1 - K_1 [1 - \exp(\frac{V + dv}{K_2 V_{oc}})]\} + D \quad (7)$$

式中: S_{ref} 为标准测试条件下(STC)光照强度参考值, 为 1000 W/m^2 ; T_{ref} 为光伏电池参考温度, 为 25°C ; S , T 为某个任意时刻的光强强度和光伏电池板温度; S_1 , T_1 , K_1 , K_2 , D 均为公式中的过渡迭代变量; 根据以上公式在 Simulink 中搭建光伏电池模块, 输入参数为光照强度 (S)、温度 (T) 和电压 (V), 输出参数为电流 (I), 最后将其封装为一个独立的光伏 PV 模块。

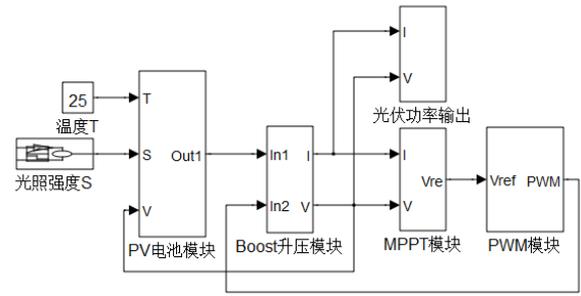


图 1 光伏发电系统模型

Fig. 1 PV system model

1.2 DC-DC 变换器电压转换模块

本文模型中的 DC-DC 变换器采用 Boost 升压电路, 这是一种开关直流升压电路, 它可以使输出电压比输入电压高。在该模块中, $L = 10 \text{ mH}$, $C = 300 \text{ pF}$, $R = 30 \Omega$ 。

1.3 MPPT 控制模块

模型中最大功率点跟踪采用的是干扰观察法, 原理是先让光伏阵列工作在某一给定参考电压下, 得到此时的输出功率并记录。然后在该电压的基础上增加正向值, 再检测此时的输出功率。如果功率增加, 则表明还没有达到最大功率点, 则需要继续增加正向值。反之, 如果功率降低, 则已经超过最大功率点, 应当降低输出电压, 并且在下一个控制周期时增加负向值, 实现左移来接近最大功率点。由于该方法具有简单、容易实现的优点, 而且对传感器精度要求不高, 所以将其作为本模块中 MPPT 的实现方法。

1.4 PWM 模块

该模块中 PWM 波由 MPPT 模块得到的输出信号与三角波进行调制得到。然后再根据产生的 PWM 输出驱动信号来控制 Boost 电路中 IGBT 开关导通或者关断, 从而最终实现 MPPT 控制。

1.5 算例分析

以本文中研究的光-火微网系统中的光伏发电系统为例, 装机容量为 35 MW 。光伏发电输出主要受天气影响, 特别是在多云天气下, 系统发电功率会出现明显的起伏波动, 往往发电功率的最大变化率超过 10% 额定出力^[12]。所以本文选择了具有代表性的多云天气条件下的一天光照强度为样本, 光伏系统的光照采样时间为 $6:00 \sim 18:00$, 采样时间间隔 Δt 为 1 min , 光照样本如图 2 所示。该光照样本的平均光照强度为 380.8026 W/m^2 。因为太阳照射角度和云层遮挡等原因, 该样本中光照强度在一天之中出现了多个峰值, 各个时间点的数值大小也具有比较大的差异, 表现出明显的间歇性和不稳定性^[13]。

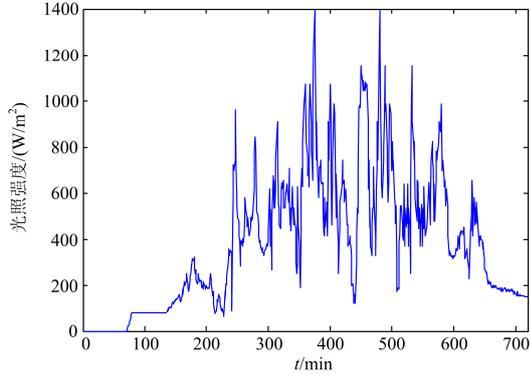


图 2 光伏发电系统的光照强度样本
Fig. 2 Light intensity sample of PV system

将参考温度值 25°C 和图 2 中的光照强度样本作为图 1 中光伏发电系统模型中 PV 电池模块的输入, 仿真模拟得到本文光-火微网系统中光伏电站在多云天气下一天的出力曲线, 如图 3 所示。根据所示数据曲线可知, 在多云天气下太阳能光伏发电的功率并不高, 在早上 6:00~10:00 以及下午 4:00~6:00 两个时间段明显因为太阳光照不足导致光伏系统输出功率偏低。一天中系统最高输出功率是 47.3963 MW, 最低输出功率为 0 MW, 计算求得平均输出功率为 12.787 MW, 远远低于额定功率。分析可知系统输出功率大小在很大程度上取决于光照强度。当光照强度变化时, 最大功率点变化幅度较大, 而且光照强度高时系统输出功率高, 光照强度低时系统输出功率跟着变低, 光伏系统的输出功率明显受一天光照强度变化的影响。

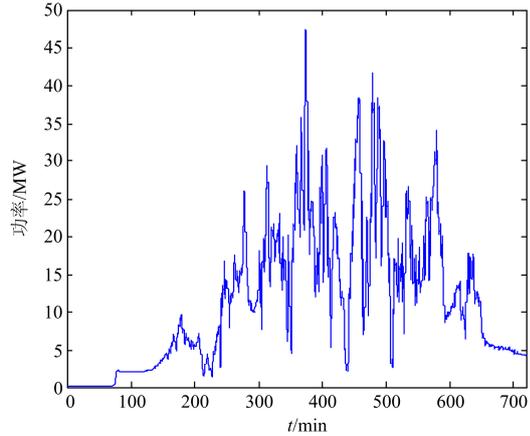


图 3 光伏发电系统的出力曲线
Fig. 3 Output curve of PV system

2 光-火微网系统的频率控制

2.1 火力发电机组的频率控制

电网中电力系统的频率是靠两个部分之间的平衡所维持的。一部分就是系统中所运行的所有发电

机组的有功功率, 而另一部分就是系统内部所有负荷消耗的有功功率总和。然而电力系统的负荷是不稳定的, 它的改变会引起系统频率的变化。为了保证电力系统频率在允许的范围之内, 也就是 50 Hz 附近, 需要通过发电机组的调速系统和电网的 AGC 来调节供电功率^[14]。图 4 为火力机组的频率调节模型^[15]。

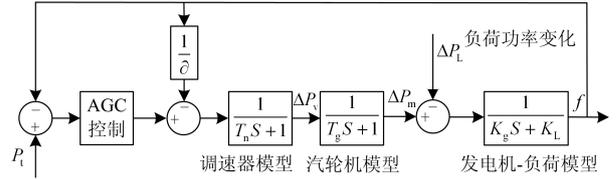


图 4 火力机组的频率控制模型

Fig. 4 Frequency control model of thermal unit

其中 δ 为机组的调差系数, 调差系数的大小对维持系统频率的稳定影响很大。为了减小系统频率波动, 要求调速系统有合理的调差系数值, 一般为 4%~5%, T_n 为调速器时间系数, 一般为 0.05~0.25 s, T_g 为原动机的时间系数, 一般为 0.2~2 s, K_g 为机组的惯性时间常数, 一般为 5~10 s, K_L 为负荷的频率调节效应系数(又称系统负荷阻尼常数), 一般为 1~3。

2.2 光伏系统对微网系统频率的影响及控制策略

由于光照强度随着时间变化会表现出明显的差异性, 光伏出力的波动特性在时间尺度上表现出一定的区别^[16]。在不考虑系统网损的情况下, 微网系统在经过一次调频后, 电网频率会出现静态偏差 Δf , 并且满足式(8)。

$$\Delta P_L = -K_L \Delta f + \Delta P_{pv} \quad (8)$$

式中: K_L 代表负荷调节效应系数; ΔP_L 为负荷所引起的改变量; ΔP_{pv} 为光伏出力的改变量。

当光伏出力较低时, 系统的火电机组对应会增加发电功率, 而当光伏出力较高时, 火电机组则相应地降低发电功率, 所以可以将光伏出力作为负的负荷考虑, 即

$$\Delta P = \Delta P_L - \Delta P_{pv} \quad (9)$$

式中, ΔP 表示光伏出力和系统负荷所引起的电力系统有功功率总的变化量。光伏发电功率作为一个负荷扰动, 其发电功率降低, 相当于负荷需求值增加了; 其发电功率升高, 相当于负荷需求值减少了, 将式(9)代入式(8)可得:

$$\Delta P = -K_L \Delta f \quad (10)$$

由负荷的功率-频率特性可得 K_L 的标幺值为

$$K_{L^*} = -\frac{\Delta P / P_{LN}}{\Delta f / f_N} \quad (11)$$

式中: f_N 为微网系统频率的额定值; P_{LN} 是该额定值下整个系统的有功负荷。

由前面仿真测试的光伏系统发电功率特性和式(8)~式(11)可知, 随着一天中光照强度的不确定性变化, 光伏系统的功率也会跟着改变, 从而引起光-火微网的静态频率偏差随之起伏波动。而为了减小和控制这个频率偏差, 就需要通过发电机组的调速系统和电网的 AGC 来调节供电功率, 于是本文提出了将基于 NCD 优化的 PID 控制器加入到 AGC 控制模块中实现微网系统频率的控制, 控制策略模型如图 5 所示。

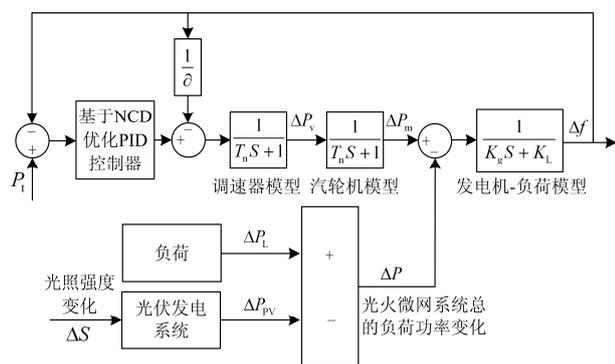


图 5 基于 NCD 优化的光-火微网频率控制模型
Fig. 5 Frequency control model of solar-thermal microgrid based on NCD

3 基于 NCD 优化的 PID 控制器

3.1 PID 控制器

常规 PID 控制器是由反馈系统偏差的比例、积分和微分的线性组合构成的反馈控制器, 又称为三态控制器(three-mode control), 主要用于基本线性和动态特性不随时间变化的系统。标准的 PID 控制器的系统原理图如图 6 所示, 其数学模型为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (12)$$

其中: $e(t)$ (误差信号)、 $u(t)$ 分别为控制器的输入和输出; K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

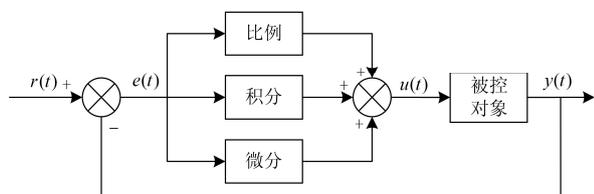


图 6 PID 控制系统原理图

Fig. 6 PID control system principle diagram

目前, 对于 PID 控制器的参数整定方法有标准

Ziegler-Nichols 方法、幅值相位裕度设定方法、最优整定方法及其他一些方法^[17-19]。这些方法在实际操作过程中表现出的控制情况都不错, 但是它们普遍局限于传统的线性系统, 对于非线性系统的控制没有体现出很好的适应性, 效果不理想。而本文中研究的光-火微网系统加入了带有很多非线性行为的光伏发电系统, 因此在本文所述的微网系统中, 基于线性化建模的传统设计方案难以获得较好的控制效果。为了解决这一问题, 提出了基于 NCD 优化的 PID 控制器来实现对微网的频率控制。

3.2 NCD 工具箱主要特点和优势

Matlab 提供了很多智能算法工具箱, 如模糊逻辑工具箱、鲁棒控制工具箱和神经网络工具箱等。就本文研究的微网系统的频率控制而言, 采用的是其中的 NCD 工具箱来优化微网系统控制器的设计并加以仿真验证。NCD 工具箱提供了时域控制设计的 GUI 界面, 能在某个非线性模型内根据需要调整相关参数来满足时域性要求, 并且能够声明多类可调变量和鲁棒性控制设计对应的不确定性参数变量。同时以 Simulink 模块的形式, 集成了基于图形界面的非线性系统控制器优化设计和仿真功能。对于本文研究的微网系统, 其主要特点和优势在于以下几点。

(1) NCD 工具箱基于时域优化的控制器设计, 能将一天中时间的变化作为参考变量, 提供系统时域性能曲线窗口, 通过曲线窗口能够动态地显示系统的输出曲线, 实时反应设计的控制器的优化效果。

(2) NCD 工具箱的人机交互界面采用图形化的展示, 通过图形交互界面可以便捷和直观地输入控制器的各类优化参数和设定系统的约束条件, 便于修改和优化。

(3) 工具箱支持存在系统的不确定特性的鲁棒控制设计, 可以指定微网系统模型中某些变量的不确定性界, 设置变化范围和幅度, 从而实现满足鲁棒性能指标的非线性控制系统设计。

(4) 工具箱可以任意选择优化参数和指标, 仿真模块中的任意不确定的变量都可以作为控制器的优化参数添加到控制设计中, 最后仿真优化确定该参数的最佳取值。

3.3 基于 NCD 优化的 PID 控制器设计

将 NCD 工具箱运用到 PID 控制器的设计中, 优化整个光-火微网频率控制的算法如下。

(1) 在 Simulink 中搭建好如图 5 所示的光-火微网频率控制模型, 调整好约束条件, 即将电网频率值波动限制在电网电力系统正常状况下, 供电频率的允许偏差范围内。

(2) 确定可调参数为 PID 控制器的 P, I, D 三个参数。

(3) 设置可调参数的初值分别为: $P=2, I=2, D=12$, 然后进行初始仿真。

(4) NCD 工具箱自动地把时域约束变为有条件约束的优化问题, 并根据序列二次规划法 SQP (Sequence Quadratic Program) 和 Quasi-Newton (拟牛顿法) 等优化算法寻找技术优化可调参数。

(5) 动态地展示整个优化过程和不同参数下电网频率的波动曲线。

(6) 优化结束, 显示最终最优参数值和仿真曲线。

3.4 基于 NCD 优化的光-火微网频率控制仿真

首先在 Matlab 中搭建图 5 中的光-火微网的频率控制模型, 由图 2 中光照强度变化曲线为微网系统的频率变化输入来源。本文中光-火微网发电系统的装机容量为 500 MW, 其中光伏发电系统的额定发电功率为 35 MW, 取 $\delta=5\%$, $T_n=0.1, T_g=0.5, K_g=5, K_L=1$ 。AGC 算法模块分别使用 PI 控制和传统 PID 控制器以及基于 NCD 优化的 PID 控制器, 得到 3 种模式下的频率控制曲线如图 7 所示。

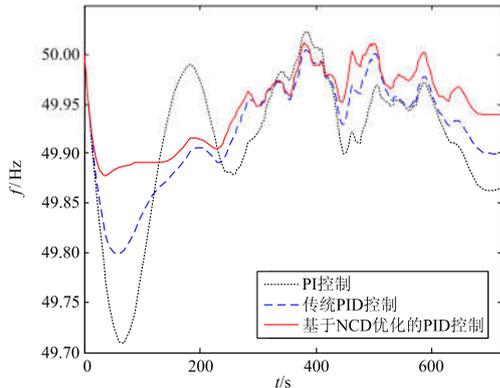


图 7 不同控制模式下光-火微网的频率变化曲线

Fig. 7 Frequency variation curve of solar-thermal microgrid under different control modes

在 3 种控制模式下, 我们得到了表 1 中光-火微网系统的频率对比的仿真数据结果。从仿真图和仿真数据表可以看出, 对于加入了光伏发电系统的光-火微网系统而言, 本文提出的基于 NCD 优化的 PID 控制器对应频率波动的调节更加迅速和高效, 频率的最大偏移量更小, 控制效果远优于 PI 控制和传统的 PID 控制调频方式。因此, 当主要因为光照强度变化带来的系统总负荷变化引起电网频率发生偏差时, 基于 NCD 优化的 PID 控制方法在频率的控制调节效果上有着更快的响应性和更小的超调量。

表 1 光-火微网系统的频率对比仿真结果

Table 1 Frequency comparison simulation results of

| solar-thermal microgrid | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 控制模式 | 微网系统最低频率/Hz | 微网系统最高频率/Hz | 频率振荡幅度/Hz |
| PI 控制 | 49.7092 | 50.0236 | 0.3144 |
| 传统 PID 控制 | 49.7983 | 50.0052 | 0.2069 |
| NCD 优化 PID | 49.8783 | 50.0130 | 0.1347 |

3.5 鲁棒性验证

鲁棒性是指当对象特性发生变化时, 系统保持性能不变的能力。对于一个控制系统而言, 当然希望鲁棒性越强越好。为了验证基于 NCD 优化的 PID 控制器具有良好的鲁棒性, 在其他条件不变的情况下, 改变系统中调速器时间参数 T_n 的值和原动机的时间参数 T_g 的值, 得到控制结果如图 8 和图 9 所示。在图 8 中, T_n 不变, T_g 在 0.2~2 s 波动。在图 9 中, T_g 不变, T_n 在 0.05~0.25 s 内波动。

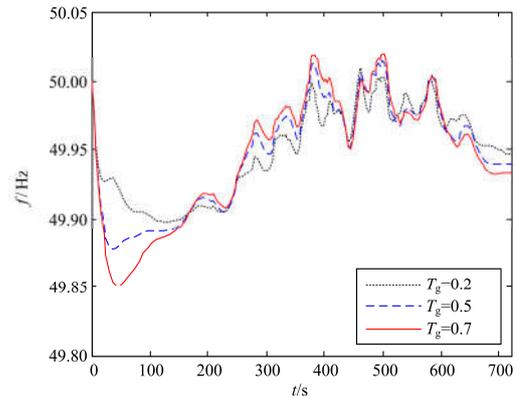


图 8 不同原动机时间参数下光-火微网的频率变化曲线

Fig. 8 Frequency variation curve of solar-thermal microgrid under different prime mover time parameters

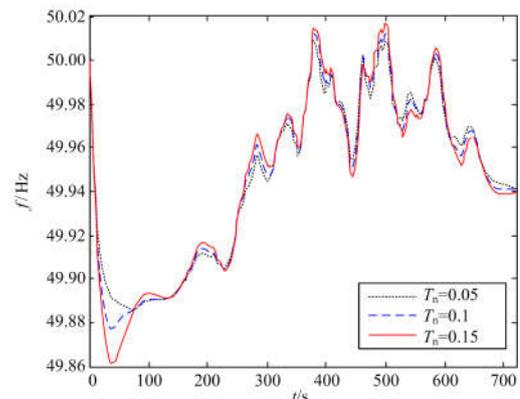


图 9 不同调速器时间参数下光-火微网的频率变化曲线

Fig. 9 Frequency variation curve of solar-thermal microgrid under different governor time parameters

根据仿真结果可知, T_n 不变, T_g 分别取值 0.2、0.5 和 0.7 的情况下, 微网系统的电网频率值在最初时刻会有差异, 但很快就趋于一致, 数值上基本相同。 T_g 不变, T_n 分别取值 0.05、0.1 和 0.15, 仿真测试后得到了相同的效果, 这说明该控制系统具有很强的鲁棒性, 在一定的参数摄动下, 能够维持其性能的稳定。

4 结论

本文以光伏发电系统和常规火力机组组成的光-火微网系统为研究对象, 首先介绍了光伏发电系统的发电原理并搭建了数学模型进行仿真测试, 得到光伏发电系统一天的出力曲线, 结果表明光伏系统输出功率值在很大程度上取决于光照强度。然后介绍了本文微网系统中的频率控制策略, 在传统控制器原理的基础上提出了基于 NCD 优化的 PID 控制器, 并将其用于频率控制模型中。最后选取具有代表性的多云天气条件下一天之内的光照强度变化数据, 仿真测试得到该控制模式下微网系统的频率变化曲线, 并与相同条件下采用 PI 控制和传统的 PID 控制的方式进行对比分析。

通过算例验证分析表明, 本文提出的基于 NCD 优化的 PID 控制器, 是一种非线性的控制策略, 对非线性系统具有很强的适应性, 适用于光-火微网系统。对微网系统在频率最大值、最小值和振荡幅度等方面进行数据分析, 结果表明该控制器比传统的 PID 控制等方式具有更快的响应性和更强的鲁棒性。

本文的光-火微网系统仿真模型没有考虑光伏组件、逆变器的寿命周期性老化等问题, 同时线路布局、灰尘遮挡、电池串并联损失、线缆损失等多种因素也会一定程度上影响整个系统的频率变化, 这些都将是今后大规模光伏发电并网后控制电网频率所需要研究的重要方向^[20-23]。

参考文献

- [1] 张培高, 李兴源, 李政. 孤网频率稳定与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 143-149, 155.
ZHANG Peigao, LI Xingyuan, LI Zheng. Research on frequency stability and control strategy in isolated power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 143-149, 155.
- [2] 张欢欢. 光伏发电系统的 MATLAB 设计与仿真[J]. 控制工程, 2013(增刊 1): 26-29.
ZHANG Huanhuan. Design for photovoltaic power generation system based on MATLAB[J]. Control Engineering of China, 2013(S1): 26-29.
- [3] 严国康, 卢继平, 徐琳. 基于 Matlab/Simulink 的光伏电池工程用仿真模型[J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2681-2683.
YAN Guokang, LU Jiping, XU Lin. Engineering simulation model of photovoltaic cells based on Matlab/Simulink[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(12): 2681-2683.
- [4] 杭凤海, 杨伟, 朱文艳. 光伏系统 MPPT 的扰动观测法分析与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 110-114.
HANG Fenghai, YANG Wei, ZHU Wenyan. Analysis and improvement of MPPT disturbance observer method for PV system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 110-114.
- [5] 王丰, 孔鹏举, LEE F C, 等. 基于分布式最大功率跟踪的光伏系统输出特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 127-134.
WANG Feng, KONG Pengju, LEE F C, et al. Output characteristic analysis of distributed maximum power point tracking PV system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 127-134.
- [6] 唐磊, 曾成碧, 苗虹, 等. 基于蒙特卡洛的光伏多峰最大功率跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 170-176.
TANG Lei, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. A novel maximum power point tracking scheme for PV systems under partially shaded conditions based on Monte Carlo algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 170-176.
- [7] 徐诚, 刘念, 赵泓, 等. 基于电力系统二次调频原理的微电源频率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 14-20.
XU Cheng, LIU Nian, ZHAO Hong, et al. A novel frequency control strategy of micro-grid based on the secondary frequency regulation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 14-20.
- [8] 陈林. 孤岛运行发电机组 DEH 系统二次调频 PID 设计及实践探讨[J]. 硅谷, 2014(18): 45-48.
CHEN Lin. Design and practice of PID system for two time frequency modulation of DEH system in isolated island operation[J]. Silicon Valley, 2014(18): 45-48.
- [9] 许方圆. 光伏并网系统中的非线性现象分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
XU Fangyuan. Analysis of nonlinear phenomenon in grid-connected PV system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [10] 杨金孝, 朱琳. 基于 Matlab/Simulink 光伏电池模型的

研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(24): 192-194.
 YANG Jinxiao, ZHU Lin. Research on photovoltaic cell model based on Matlab/Simulink[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(24): 192-194.

[11] 程时润, 万钧力, 刘浩, 等. 基于 LabVIEW 的光伏电池建模与仿真[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 17-21.
 CHENG Shirun, WAN Junli, LIU Hao, et al. Modeling and simulation of photovoltaic cells based on LabVIEW[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 17-21.

[12] 李建林, 籍天明, 孔令达, 等. 光伏发电数据挖掘中的跨度选取[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 450-456.
 LI Jianlin, JI Tianming, KONG Lingda, et al. Span determining of photovoltaic generation data mining[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 450-456.

[13] 刘琳. 光伏电站有功功率优化分配[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 104-108.
 LIU Lin. Active power control in photovoltaic power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 104-108.

[14] 谭涛, 姜杰, 何潜, 等. 省级电网 AGC 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 63-66.
 TAN Tao, JIANG Jie, HE Qian, et al. Research on provincial power grid AGC control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 63-66.

[15] 谷俊杰, 陈顺青, 宋雪梅, 等. 超临界火电机组负荷-频率控制仿真[J]. 热力发电, 2015, 44(1): 13-18.
 GU Junjie, CHEN Shunqing, SONG Xuemei, et al. Simulation of unit load frequency control for supercritical units[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(1): 13-18.

[16] 蒋小亮, 丁岩, 全少理, 等. 光伏渗透率对电力系统频率的影响及控制策略[J]. 武汉大学学报, 2015, 48(5): 686-689.
 JIANG Xiaoliang, DING Yan, QUAN Shaoli, et al. Influence of photovoltaic penetration on power system frequency and its control strategy[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(5): 686-689.

[17] 赵秀伟, 任建岳. 确保稳定裕度的 PID 稳定域计算[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3214-3222.
 ZHAO Xiuwei, REN Jianyue. Computation of PID stabilizing region with stabilized margins[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3214-3222.

[18] 徐奉友, 李朝锋, 陶学军, 等. 一种基于自适应控制算法的光伏发电站自动发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 128-131.
 XU Fengyou, LI Chaofeng, TAO Xuejun, et al. A photovoltaic automatic generation control system based on adaptive control algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 128-131.

[19] 王荣杰, 詹宜巨, 周海峰, 等. 基于差分进化机理优化的 PID 控制的 AVR 系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 108-114.
 WANG Rongjie, ZHAN Yiju, ZHOU Haifeng, et al. PID controlled AVR system based on differential evolution mechanism optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 108-114.

[20] 刘宝柱, 颜洪正, 王立国. 一种用于计算光伏组件温度的多元非线性函数拟合与修正方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 44-49.
 LIU Baozhu, YAN Hongzheng, WANG Ligu. A multivariate nonlinear function fitting and modified method for calculating the temperature of PV modules[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 44-49.

[21] 易映萍, 罗海, 胡四全. 小功率光伏并网逆变器控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 64-68.
 YI Yingping, LUO Hai, HU Siquan. Study on control scheme based on low-power photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 64-68.

[22] 陈世慧, 阮大兵. 光伏发电有功功率预测及其在电网频率控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 125-129.
 CHEN Shihui, RUAN Dabing. Prediction of photovoltaic power and its application in power grid frequency control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 125-129.

[23] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.
 FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.

收稿日期: 2016-07-04; 修回日期: 2016-08-09

作者简介:

莫槟滔(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网、电力系统广域测量与控制; E-mail: 103478201@qq.com

陈 峦(1973—), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事计算智能及其应用、电力系统自动化方面的研究;

井 实(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事智能电网信息技术、电力系统自动化方面的研究。

(编辑 葛艳娜)