

# 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

徐奉友, 李朝锋, 陶学军, 邓清闯, 秦天

(许昌许继风电科技有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 光伏电站组成结构时有变化, 导致了光伏电站数学模型的时变性和非线性, 基于固定参数 PID 控制算法的自动发电控制系统不能应对这种变化。为了提高光伏电站自动发电控制系统的调节性能, 对它的控制算法进行了研究。针对光伏电站, 基于波波夫超稳定理论, 设计了一种离散自适应控制算法。某 50 MW 光伏电站, 基于该算法的自动发电控制系统与基于固定参数 PID 算法的自动发电控制系统, 对它们的控制效果进行了比较分析。仿真结果表明, 基于该算法的自动发电控制系统具有优越性和可行性。

**关键词:** 自动发电控制; 光伏电站; 自适应控制

## A photovoltaic automatic generation control system based on adaptive control algorithm

XU Feng-you, LI Chao-feng, TAO Xue-jun, DENG Qing-chuang, QIN Tian

(Xuchang XJ Wind Power Technology Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The structure of photovoltaic power plant changes from time to time, which leads to nonlinear, time-invariant characteristics of the mathematical model of the photovoltaic power plant. The automatic generation control system based on PID control algorithm with constant parameters can't cope with them well. To improve the performance of the automatic generation control system, its control algorithm is studied. For photovoltaic plants, a discrete adaptive control algorithm is designed based on Popov superstability theory. In a 50 MW photovoltaic plant, the performances of the automatic generation control system based on this adaptive control algorithm and that based on PID algorithm with constant parameters are compared. The simulation proved the superiority and feasibility of the automatic generation control system based on this adaptive algorithm.

**Key words:** automatic generation control; photovoltaic power plant; adaptive control

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0128-04

## 0 引言

随着越来越多的光伏电站并网发电, 光伏能源的不稳定性对电网造成越来越大的不利影响。为了推动光伏发电项目进展, 积极利用绿色可持续能源, 并减小它对电网稳定性的破坏, 国家相关机构和电网系统要求光伏电站应具有 AGC (自动发电控制) 功能<sup>[1-2]</sup>。然而国内分布式能源的 AGC 系统研究起步较晚, 目前国内光伏电站 AGC 技术还不成熟, 大部分光伏电站仍运行在最大功率输出模式下, 根本不具有 AGC 功能。实现光伏电站自动电压控制需要克服两个难题: 准确的发电功率预测<sup>[3-4]</sup>, 高性能的控制算法设计。纵观国内外光伏电站 AGC 相关产品 and 论文, 大都采用经典 PID 控制算法<sup>[5]</sup>, 在工况变化较小且并网要求不高的情况下, 这种算法

能够满足控制要求。为了提高光伏电站 AGC 的控制性能, 适应越来越苛刻的并网需求, 需要充分考虑光伏电站的特殊性: 包括参与 AGC 系统的逆变器类型和数量的变化都会引起光伏电站发电出力动态性能的变化。甚至于光伏电站可能包含多种发电设备<sup>[6-8]</sup>, 投入运行的发电设备不同、设备数量随机变化, 进一步加剧了电站发电出力动态特性的多样性。拥有固定参数的 PID 控制算法显然不能适应光伏电站整体发电系统的动态需求。为了使光伏电站在多变的运行工况下, 保持最优的动态性能——调节过程平稳、无超调, 调节时间适中——笔者参考常规电站 AGC 控制策略, 并参阅文献<sup>[9-11]</sup>, 提出了基于超稳定理论的模型参考自适应控制算法, 最后, 针对光伏电站做了仿真, 验证了算法的优越性和可行性。

## 1 光伏电站数学模型

AGC 系统需要控制电站并网点输出的有功功率满足调度需求。图 1 是光伏电站 AGC 系统原理图,  $P_{\text{ref}}$  为调度下发的有功功率指令。为了简化叙述, 假设光伏电站仅包含不同型号的逆变器。

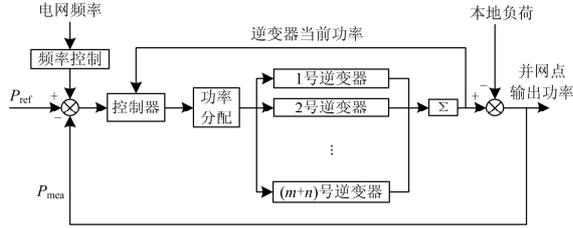


图 1 AGC 系统原理图

Fig. 1 AGC system block diagram

功率分配模块选用如式 (1) 的计算方法。

$$P_{\text{ref}}^i = P_{\text{refg}} \frac{P_{\text{e}}^i}{\sum_{j=1}^n P_{\text{e}}^j} = P_{\text{refg}} k^i \quad (1)$$

其中:  $n$  是光伏电站中功率可调逆变器的总台数;  $m$  为功率不可调逆变器的总台数;  $P_{\text{e}}^i$  为第  $i$  号逆变器的额定功率;  $P_{\text{ref}}^i$  为第  $i$  号逆变器的有功功率参考值;  $P_{\text{refg}}$  为功率可调逆变器有功功率参考值之和;

$$k^i = \frac{P_{\text{e}}^i}{\sum_{j=1}^n P_{\text{e}}^j}。$$

光伏逆变器数学模型线性化处理, 可以用式 (2) 的传递函数近似描述。

$$G_i(z) = \frac{b_1^i z + b_2^i}{z^2 - a_1^i z - a_2^i} \quad (2)$$

式(2)变换为差分方程的形式, 如式(3)。

$$y^i(n) = a_1^i y^i(n-1) + a_2^i y^i(n-2) + x^i(n-1)b_1^i + x^i(n-2)b_2^i \quad (3)$$

式中:  $y^i(n)$ 、 $x^i(n)$  分别为第  $i$  号逆变器在第  $n$  次采样时有功功率输出值和有功功率给定值;  $a_1^i$ 、 $a_2^i$ 、 $b_1^i$ 、 $b_2^i$  为第  $i$  号逆变器的传递函数系数。不同型号的逆变器对应的系数不一致。

把功率可调逆变器群看作一个模块, 这个模块的差分方程为

$$y(n) = \sum_{i=1}^n [a_1^i y^i(n-1) + a_2^i y^i(n-2) + x^i(n-1)b_1^i + x^i(n-2)b_2^i] = \quad (4)$$

$$y(n-1) \sum_{i=1}^n s_1^i + y(n-2) \sum_{i=1}^n s_2^i + x(n-1) \sum_{i=1}^n r_1^i + x(n-2) \sum_{i=1}^n r_2^i$$

$$\text{其中: } s_1^i = \frac{a_1^i y^i(n-1)}{y(n-1)}, \quad s_2^i = \frac{a_2^i y^i(n-2)}{y(n-2)}$$

$$r_1^i = a_1^i k^i \geq 0; \quad r_2^i = a_2^i k^i \geq 0; \quad x(n) \text{ 和 } y(n) \text{ 分别是功}$$

$$\text{率可调逆变器的总输入和总输出。令 } p_1 = \sum_{i=1}^n s_1^i,$$

$$p_2 = \sum_{i=1}^n s_2^i, \quad q_1 = \sum_{i=1}^n r_1^i \geq 0, \quad q_2 = \sum_{i=1}^n r_2^i \geq 0, \quad \text{则}$$

式 (4) 可以变化为

$$y(n) = p_1 y(n-1) + p_2 y(n-2) + q_1 x(n-1) + q_2 x(n-2) \quad (5)$$

显然  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $q_1$ 、 $q_2$  是时变系数, 它们随电站结构变化而变化。除了逆变器, 光伏电站中一般发电设备的数学模型都可以用式 (2) 来描述, 所以式 (5) 在包含多种类型发电设备的光伏电站中同样适用。由此得知, 光伏电站数学模型是一个非线性时变模型。

然而, 电网调度要求光伏电站在不同工况下表现出固定的动态性能, 笔者根据这种需求, 设计了一个光伏电站参考模型, 在某种自适应控制器的控制下, 从电网调度角度来看, 光伏电站始终保持与参考模型有一致的动态特性, 这种参考模型的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (6)$$

依据国家相关技术标准, 不同容量的电站有不同的功率变化率范围, 所以参数  $\tau$  需要根据电站容量确定。因为光伏电站 AGC 系统一般是离散控制系统, 所以需要把式 (6) 离散化, 离散化后的参考模型如式 (7)。

$$y_m(n) = e^{-\frac{T}{\tau}} y_m(n-1) + (1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) x_m(n-1) \quad (7)$$

## 2 基于超稳定理论的模型参考自适应控制

为了使式 (5) 描述的数学模型与式 (7) 描述的数学模型有相同的动态性能, 需要对式 (5) 进行补偿, 补偿环节 (控制器) 可以借助模型参考自适应控制理论<sup>[12]</sup>来设计, 文章采用了基于波波夫超稳定理论的离散控制系统设计方法。

电站模型式 (5) 经补偿器补偿后, 后验输出 (电站实际输出) 为

$$y(n) = p_{1s}(n)y(n-1) + p_{2s}(n)y(n-2) + q_{1s}(n)x(n-1) + q_{2s}(n)x(n-2) \quad (8)$$

电站模型经补偿后, 先验输出为

$$\hat{y}(n) = p_{1s}(n-1)y(n-1) + p_{2s}(n-1)y(n-2) + q_{1s}(n-1)x(n-1) + q_{2s}(n-1)x(n-2) \quad (9)$$

电站参考模型输出值与补偿后的电站实际输出值之间的偏差为

$$e(n) = y_m(n) - y(n) \quad (10)$$

电站参考模型输出值与补偿后的电站模型先验输出值之间的偏差为

$$\hat{e}(n) = y_m(n) - \hat{y}(n) \quad (11)$$

线性补偿器:

$$\hat{v}(n) = \hat{e}(n) + d_1 e(n-i) \quad (12)$$

根据波波夫超稳定判据, 得到如下递推公式:

$$p_{1s}(n) = p_{1s}(n-1) + \frac{\sigma_1 y(n-1)}{1 + \sum_{i=1}^2 [\sigma_i y^2(n-i) + \eta_i x^2(n-i)]} \hat{v}(n) \quad (13)$$

$$p_{2s}(n) = p_{2s}(n-1) + \frac{\sigma_2 y(n-2)}{1 + \sum_{i=1}^2 [\sigma_i y^2(n-i) + \eta_i x^2(n-i)]} \hat{v}(n) \quad (14)$$

$$q_{1s}(n) = q_{1s}(n-1) + \frac{\eta_1 x(n-1)}{1 + \sum_{i=1}^2 [\sigma_i y^2(n-i) + \eta_i x^2(n-i)]} \hat{v}(n) \quad (15)$$

$$q_{2s}(n) = q_{2s}(n-1) + \frac{\eta_2 x(n-2)}{1 + \sum_{i=1}^2 [\sigma_i y^2(n-i) + \eta_i x^2(n-i)]} \hat{v}(n) \quad (16)$$

$$|d_1| < 1 \quad (17)$$

式(13)~式(16)中,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 均为正数。在满足式(17)的前提下, 如果式(8)的系数按照式(13)~式(16)规律更新, 则在经过足够长的控制周期后, 补偿后的光伏电站式(8)与参考模型式(7)将有相同的动态特性。

### 3 仿真分析

西北某光伏电站容量为 50 MW, 电站中参与 AGC 调节的逆变器分为两类, 它们有不同的动态性能, 每类逆变器均为 50 台。依据《光伏电站接入电网技术规定》<sup>[2]</sup>规定, 每分钟电站输出变化量不能超过 10 MW, 但考虑到电站有功功率控制的快速性需求和本地供电负荷需求, 电站发电量变化率又不能太低, 综合各种因素, 笔者选择了一个电站理想动态模型为

$$G(s) = \frac{1}{10s+1} \quad (18)$$

这个模型在下面叙述的 AGC 系统中, 作为参

考模型使用。

#### 3.1 传统 AGC 系统

采用双闭环控制结构。其中外环接收调度指令并与并网点输出值相比较得到有功功率偏差, 有功功率偏差经斜坡限幅(功率变化率限幅)后送给内环, 作为内环参考值, 外环控制周期为 20 s; 内环接收并执行外环指令, 同时保证电站发电量平稳变化, 控制周期为 2 s, 采用固定参数的 PID 控制算法。

#### 3.2 自适应 AGC 系统

同样采用双闭环控制系统: 外环与传统 AGC 系统的外环结构一致, 控制周期也一致; 内环控制周期也为 2 s, 但控制算法为自适应控制算法。设定内环参考模型为电站理想动态模型, 即式(18)。

仿真验证条件: 实验初期, 全站 100 台逆变器同时参与 AGC 调节。在运行 1 000 s 后, 第二类逆变器中的 40 台因故障退出 AGC 调节系统。图 2、图 3 为传统 AGC 控制器和自适应控制器的仿真结果, 纵坐标为电站逆变器总有功功率。

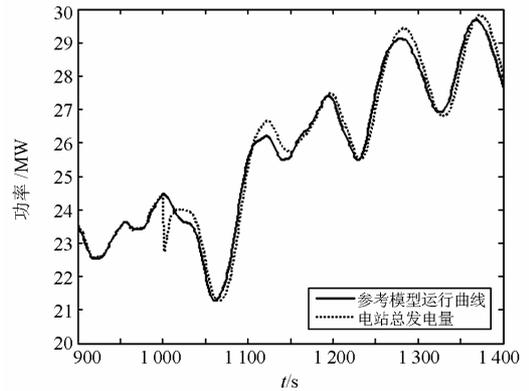


图 2 传统 AGC 控制器控制效果图

Fig. 2 Simulation result of the conventional AGC controller

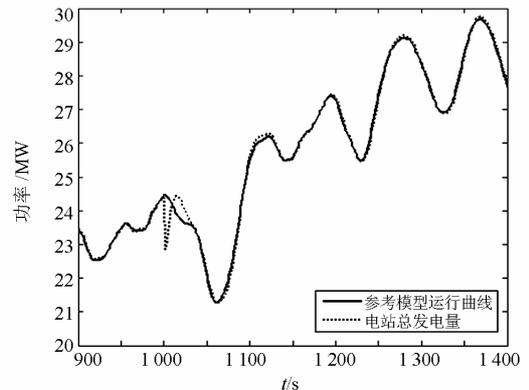


图 3 自适应 AGC 控制器控制效果图

Fig. 3 Simulation of the adaptive AGC controller

由仿真结果可以看出, 在固定工况下, 反复调整传统 AGC 控制器内环 PI 参数, 可以使电站动态特性逼近理想模型, 但在部分逆变器因故退出 AGC 调节时, 内环动态特性偏离了理想模型的动态特性, 且自身无法修复这种偏离; 而自适应 AGC 控制器, 在部分逆变器因故退出 AGC 系统后, 内环的动态特性很快自动恢复到理想状态。不难看出, 自适应 AGC 控制器能够适应电站工况变化对 AGC 调节系统的影响, 使电站功率输出保持最优的动态性能。

#### 4 结论

文章针对光伏电站发电出力控制难题, 设计了一种自适应 AGC 控制器, 它能够适应光伏电站运行工况的变化, 自动优化光伏电站动态特性, 在保证稳定前提下, 提高调节过程的平稳性, 减小电站对电网的冲击。不难分析这种自适应 AGC 控制器同样适用于各类新能源发电站。

#### 参考文献

- [1] Q/GDW 480-20109 分布式电源接入电网技术规定[S]. Q/GDW 480-20109 technical rule for distributed resources connected to power grid[S].
- [2] Q/GDW 617-2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. Q/GDW 617-2011 technical rule for photovoltaic power station connected to power grid[S].
- [3] 张艳霞, 赵杰. 基于反馈型神经网络的光伏系统发电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 96-101.  
ZHANG Yan-xia, ZHAO Jie. Application of recurrent neural networks to generated power forecasting for photovoltaic system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 96-101.
- [4] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于模糊识别的光伏发电短期预测系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 83-87.  
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Short-term photovoltaic generation forecasting system based on fuzzy recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 83-87.
- [5] CAMACHO E F, RUBIO A F R, BERENGUEL M, et al. A survey on control schemes for distributed solar collector fields part I: modeling and basic control approaches[J]. Solar Energy, 2007(81): 1240-1251.
- [6] 周年成, 邓浩, 王强刚, 等. 光伏与微型燃气轮机混合微网能量管理研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 74-83.  
ZHOU Nian-cheng, DENG Hao, WANG Qiang-gang, et al. Energy management strategy of PV and micro-turbine hybrid micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 74-83.
- [7] 李海平, 唐巍. 风/光/储混合微电网的详细建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 132-138.  
LI Hai-ping, TANG Wei. Detailed modeling and simulation of wind/PV/storage hybrid micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 132-138.
- [8] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.  
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tian-jin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [9] 李朝锋, 邓小玲. PLC 在水电厂负荷控制中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(4): 17-19.  
LI Chao-feng, DENG Xiao-ling. The usefulness of PLC in the load control for the hydropower plant[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006, 30(4): 17-19.
- [10] 颜伟, 赵瑞锋, 赵霞, 等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 149-155.  
YAN Wei, ZHAO Rui-feng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 149-155.
- [11] 邓浩, 周念成, 王强刚, 等. 光伏并网功率调节系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 62-66.  
DENG Hao, ZHOU Nian-cheng, WANG Qiang-gang, et al. Modeling and simulation of grid-connected photovoltaic power regulation system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 62-66.
- [12] 李严俊, 张科. 自适应控制理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.  
LI Yan-jun, ZHANG Ke. Adaptive control theory and application[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.

收稿日期: 2013-09-23; 修回日期: 2013-12-09

作者简介:

徐奉友(1979-), 男, 工程师, 从事风电、光伏电站并网控制系统算法与程序设计; E-mail: Xufengyou@xjgc.com

李朝锋(1978-), 男, 高级工程师, 从事风力发电、光伏发电、水电等新能源系统设计、控制产品研发等工作;

陶学军(1971-), 男, 高级工程师, 从事风电、光伏等分布式能源控制系统策划、设计、研发等工作。