

光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制设计

对光伏发电机进行三电平整流耦合控制设计,提高光伏发电机的最大功率跟踪控制能力,减少因转动惯量耦合出现的输出误差。传统的控制方法采用PID模糊同步控制方法,同步跟踪控制性能较差。提出一种基于三层前向神经元低压差线性跟踪的光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制方法,采用阶跃响应曲线法对电动机时滞耦合系统的功率输出建立传递函数,设计三阶光伏发电机PID自抗扰控制器的非线性反馈系统,构建三层前向神经元PID变结构网络积分器,得到PID神经元自适应变结构同步控制律,构建光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制目标函数,并进行自适应门限控制,使输出功率最大,提高控制性能和准确度。仿真结果表明,该控制算法对光伏发电机的A-D采样三电平整流解耦性能较好,提高同步跟踪控制性能,发电机控制响应速度更快,超调和稳态误差得到抑制,展示了较好的应用价值。

徐瑞丽 尹飞凰/河南职业技术学院电气工程系



徐瑞丽/讲师

关键词/Keywords

光伏发电机·
PID神经元·
耦合控制·

光伏发电是根据光生伏特效应原理,利用光伏电池将太阳能直接转化为电能。随着现代工业生产的快速发展,对发电机的控制要求和节能要求越来越高。光伏发电机能有效满足节能环保高效生产的需求,因而在现代工业中得到广泛的应用,光伏发电系统主要由光伏电池板(组件)、控制器和逆变器三大部分组成。通过光伏效应,采用高能VCZ晶体发电板和太阳光互感对接,实现电力生成;通过光伏发电,由光子(光波)转化为电,因此,光伏发电是一个由光能量转化为电能的过程,不论是独立使用还是并网发电,光伏发电机的控制系统都是制约光伏发电产能和性能的重要因素,光伏发电机外电场环境呈现一种非线性时变特征,难

以实现有效的跟踪控制,研究光伏发电机的整流耦合控制设计方法受到人们的重点关注^[1]。

传统方法中,对光伏发电机的整流耦合控制需要采用PID控制算法,随着对光伏发电机控制方法研究的深入,相关的算法也得到改进,主要有硅光主频法、阻抗法以及人工神经网络、低压原理等智能方法^[2-3],光伏发电机的整流误差放大器将输出的反馈采样电压与基准参考电压进行研究^[4],通过放大差值来控制调整电压的导通状态,从而达到稳定输出低压的目的。相关的研究已取得一定的成果,其中文献[5]中提出一种自适应模糊控制技术的光伏发电机控制系统,采用确定性分叉和边界的全局优化方法提高发电机性能,但该算法自适应控制性能并不好;文献[6]提出基于柔性PID控制的超宽带外电场光伏发电机最大功率控制技术,使用实验设计方法对无刷直流发电机进行优化,同时使用基因遗传算法对发电机性能进行优化,其目标函数为在120°电角度内增加电动势的平均值,导致控制出现阻尼振荡的影响以及动态稳定性较差的问题,传统PID光伏发电机控制的同步跟踪控制性能较差。针对上述问题,本文提出一种基于三层前向神经元低压差线性跟踪的光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制方法。首先进行光伏发电机系统数学模型设计,给出模型参数,设计改进的PID控制器对光伏发电机的整流耦合控制进行改进,仿真实验验证了其性能,展示了

本文算法的优越性。

光伏发电系统模型及耦合控制原理

1. 光伏发电系统模型

为了实现对光伏发电机的A-D采样三电平整流耦合控制,首先构建光伏发电系统模型,光伏发电系统主要由光伏电池板(组件)、控制器和逆变器三大部分组成^[7]。实物如图1所示。



图1 光伏发电系统实物

本文所用的发电机由昆明昌达美华科技有限公司生产。光伏电池板采用多晶230 W,控制器采用GSC-LCD MPPT型太阳能控制器,逆变器采用深圳市拓普泰克电子有限公司生产的太阳能逆变器。光伏发电系统主要由电子元器件构成,不涉及机械部件。

光伏发电机虚拟开关的设计考虑到主频稳压检测需较多的信号源,所选用主料应为宽带原件。光伏发电机信号输出通过追踪器,输入到主频放大器,依据洛伦兹法则,长度为 l 的导体绕组槽满率、磁通密度和定/转子铁心磁阻分别为

$$F_m = \frac{B_r l_m}{\mu_0 \mu_{r1}} \quad (1)$$

$$A_g = l_s \frac{\beta \pi}{p} (r_r + l_g) \quad (2)$$

$$\Re = \frac{p}{\mu_0 l_s \beta \pi} \left(\frac{1}{\mu_{r1}} \int_{r_r-l_m}^{r_r} \frac{d_r}{r} + \int_{r_r}^{r_r+l_g} \frac{d_r}{r} + \frac{1}{\mu_{r2}} \int_{r_r+l_g}^{r_r+l_g+l_w} \frac{d_r}{r} \right) \quad (3)$$

在发电系统建模时,需要对目标电流矢量进行线性化处理,令 $v=r\omega_r$, $r=r_r+l_g$, $B=k_\beta k_1 B_g$, $l=l_s k_f k_c A_w/A_c$,得到光伏发电系统的感应势能 T 和高频噪声分量分别为

$$T = \frac{1}{2} M_{rl} X_{rl}^2 + \frac{1}{2} M_{rr} X_{rr}^2 + \frac{1}{2} J_{rl} \theta_{rl}^2 + \frac{1}{2} J_{rr} \theta_{rr}^2 + \frac{1}{2} M_p [(\theta_p l \cos \theta_p + X_{rm})^2 + (-\theta_p l \cos \theta_p)^2] + \frac{1}{2} J_{p\theta} \theta_p^2 + \frac{1}{2} J_{p\delta} \delta^2 \quad (4)$$

$$V = M_p g l \cos \theta_p \quad (5)$$

式中, $J_{p\delta}$ 为电流矢量对时间轴的转动惯量,其值与 θ_p 有关,产生的电压 $E=vIB$ 。

通过上述分析,得到光伏发电系统模型以及发电机组的电能传输控制系统拓扑结构,为进行光伏发电机的三电平整流耦合控制提供模型基础。

2. 光伏发电机PID耦合控制设计

在上述模型设计和描述的基础上,利用PID控制器进行光伏发电耦合控制^[8-10],采用阶跃响应曲线法对发电机时滞耦合系统的功率输出建立传递函数,即

$$\begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1.7e^{-30s}}{7s+1} & \frac{0.59e^{-27s}}{8s+1} \\ \frac{-0.6e^{-25s}}{10s+1} & \frac{1.5e^{-28s}}{9s+1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

考虑永磁体中的涡流损耗,得到光伏发电机的定子铁心最大磁密为

$$B_{sy} = \frac{\pi k_l \beta B_r l_m}{2 p l_y \ln \left(\frac{r_r + l_g + l_w}{r_r - l_m} \right)} \quad (7)$$

设计三阶光伏发电机PID自抗扰控制器的非线性反馈系统,即

$$\begin{cases} e_1(k) = x_1(k) - z_1(k) \\ e_2(k) = x_2(k) - z_2(k) \\ u_0(k) = k_p \text{fal}(e_1(k), \alpha_1, \delta_1) + k_d \text{fal}(e_2(k), \alpha_2, \delta_2) \\ u(k) = u_0(k) - \frac{z_3(k)}{b_0} \end{cases} \quad (8)$$

式中, α_1 、 α_2 、 δ_1 、 δ_2 和 b_0 为可调参数; k_p 、 k_d 为比例系数和微分系数。

在模糊PID神经网络控制系统中,将光伏发电机的电场电动势特征作为输入层数据,得到输入层至隐含层权值为 $\omega_{ij}(i=1,2; j=1,2,3)$,光伏机组的最大功率函数为

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s\dot{s} - \eta^{-1}\dot{\omega}^T\dot{\omega} \\ &= s[ce_2 + M_n^{-1}u - M_n^{-1}h_n(\varphi_a, \dot{\varphi}_a) - \\ &\quad \ddot{\varphi}_{ad} + M_n^{-1}\rho(t)] - \eta^{-1}\dot{\omega}^T\dot{\omega}\end{aligned}\quad (9)$$

设计三层前向神经元PID变结构网络积分器, 得到PID神经元自适应变结构同步控制律变为

$$u = h_n(\varphi_a, \dot{\varphi}_a) + M_n\ddot{\varphi}_{ad} - M_nce_2 - \text{sgn}(M_n)\hat{\rho}(t)\text{sgn}(s) \quad (10)$$

考虑永磁体中的涡流损耗, 在高频磁场中, 光伏发电机的涡流损耗和附加涡流损耗为

$$P_e = 0.9078k_e^n B_{\max}^n f^2 \quad (11)$$

$$P_x = 0.96k_x^n B_{\max}^{1.5} f^{1.5} \quad (12)$$

由此得到了基于三层前向神经元PID变结构的光伏发电机耦合控制输出, 下一步进行A-D采样, 同时进行三电平整流耦合控制设计, 提高光伏发电机的输出特性。

改进控制算法设计与实现

在上述光伏发电机系统模型设计和耦合控制原理描述的基础上, 进行控制算法改进设计, 传统的控制方法采用PID模糊同步控制方法, 同步跟踪控制性能较差。本文提出一种基于三层前向神经元低压差线性跟踪的光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制方法。其总体设计如图2所示。

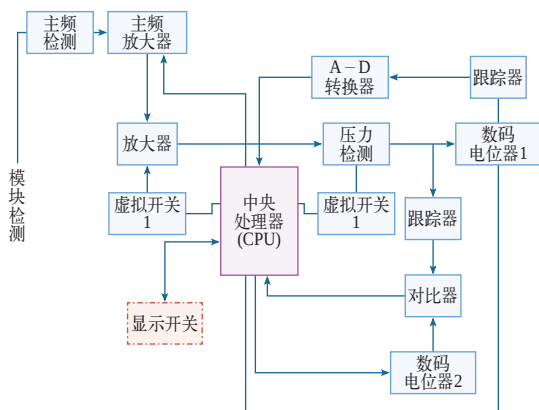


图2 光伏发电机整流耦合控制系统总体设计

图2中, 由光伏信号主频放大器输出, 经三级主频放大器放大15倍, 宽带电压通常测量稳定性, 为避免多信号输出功率测量时的误差, 在此增加了4倍放大, 从而实现了在15倍参数中间插

入3倍增益, 形成了3、10、30、100…的参数级别。主频放大后保持稳压, 即用于保持主频信号, 便于稳定记录。采样结束后通过程控闭合开关、短路峰保电容, 以准备下一个主频的测量。将光伏发电机控制器设计成两输入两输出系统, 得到三层前向神经元系统模型为

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = f_1(x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2) + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 \\ \ddot{x}_2 = f_2(x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2) + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中, y_i 为第*i*通道的输出数据。

A-D采样三电平整流耦合控制输入参数矩阵为

$$B(x, \dot{x}, t) = \begin{pmatrix} b_{11}(x, \dot{x}, t) & b_{12}(x, \dot{x}, t) \\ b_{21}(x, \dot{x}, t) & b_{22}(x, \dot{x}, t) \end{pmatrix} \quad (14)$$

分别乘上权重值 ($w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}$), 得到系统稳态输出, 即

$$\text{net}_j = \sum_{i=1}^n w_{ij}x_i(t) \quad i \neq j \quad (15)$$

由此可得光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制目标函数为

$$\begin{aligned}f_0(x) &= w_p P_1(x) + w_v P_t(x) + w_c C(x) + \\ &\frac{1}{\varepsilon} \left[f_u \frac{1-T_{\text{em}}}{T_{\text{em}}} + f_u \frac{1-\omega_r^{\max}}{\omega_r^*} + f_u \frac{B_{\text{sy}}}{B_{\text{sy}}^{\text{knee}} - 1} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

以此为目标函数, 通过增加一个跟踪误差补偿项使传输功率最大化, 然后通过自适应门限控制使输出功率最大, 提高控制性能和准确度。

仿真实验与结果分析

为了验证本文算法在实现光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制中的性能, 需进行仿真实验。设置发电机的额定功率为1 000 kW, 模块电阻 $R_s = 0.7348 \Omega$, 负载电阻 $R_r = 0.7402 \Omega$, 互感 $L_m = 0.1254 \text{ H}$; 光伏发电机参数设置中, 定子电阻 $R_s = 0.7348 \Omega$, 转子电阻 $R_r = 0.7402 \Omega$, 发电机优化后效率为96%, 转矩输出为10 N·m, 体积为 $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, 总损耗为56.7 W, 仿真得到的光伏发电机A-D输入信号如图3所示。

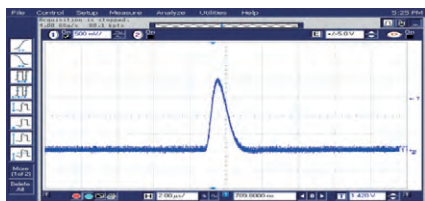


图3 光伏发电机A-D输入信号

当三电平相电阻为 $3.234\ \Omega$ 、相电感为 $11\ \text{mH}$ 、转动惯量为 $0.000\ 4\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、额定转速为 $2\ 000\ \text{r/min}$ 以及极对数为6时,采用本文设计的控制方法,得到光伏发电机A-D采样的三电平整流耦合控制输出结果,如图4所示。

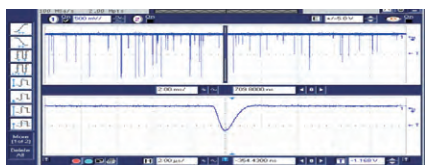


图4 光伏发电机A-D采样的三电平整流耦合控制输出

从图4可见,采用传统的光伏发电机控制模型,定子输出电流在 $0.5\sim 0.6\ \text{s}$ 区间内 d 轴分量出现了4次较大畸变;而采用本文改进的PID控制方法,光伏发电机控制响应速度更快,超调和稳态误差几乎没有,说明控制方法较好。在突加负载后,本文具有更短的调节时间;当控制过程稳定后,发电机时滞耦合系统的解耦性能较好,提高同步跟踪控制性能,说明本文算法在实现光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制的优越性。

结束语

光伏发电是一个由光能量转化为电能的过程,光伏发电机的控制系统是制约光伏发电产能和性能的重要因素,其外电场环境呈现一种非线性时变特征,难以实现有效的跟踪控制,研究光伏发电机的整流耦合控制设计方法意义较大。对光伏发电机进行三电平整流耦合控制设计,提高光伏发电机的最大功率跟踪控制能力,减少因转动惯量耦合出现的输出误差。传统的控制方法采用PID模糊同步控制方法,同步跟踪控制性能较差。本文提出一种基于三层前向神经元低压差线性跟踪的光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控

制方法。设计三层前向神经元PID变结构网络积分器,得到PID神经元自适应变结构同步控制律,从而得到光伏发电机A-D采样三电平整流耦合控制目标函数,通过增加一个跟踪误差补偿项进行自适应门限控制,使输出功率最大,提高控制性能和准确度。实验结果表明,本文算法对光伏发电机的A-D采样三电平整流解耦性能较好,提高同步跟踪控制性能,同时具有优越性。

参考文献

- [1] 雷邦军, 费树岷, 翟军勇. 静止无功补偿器(SVC)的一种新型非线性鲁棒自适应控制设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30): 65-70.
- [2] 张小冰. 变频器优化控制方法研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 409-412.
- [3] 方支剑, 段善旭, 陈天锦, 等. 储能逆变器预测控制误差形成机理及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30): 1-8.
- [4] HOLTZ J. Pulsewidth modulation for electronic power converters [J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(8): 1194-1214.
- [5] 齐昕, 周晓敏, 马祥华, 等. 感应电动机预测控制改进算法[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(3): 62-69.
- [6] 杜辉. 基于小波变换的彩色图像中快速人脸检测算法[J]. 科技通报, 2012, 12(28): 89-90.
- [7] 曹玉丽, 史仪凯, 袁小庆, 等. 自平衡机器人变论域模糊PID控制研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 347-350.
- [8] 李岳洪, 万频, 王永华, 等. 改进的细菌觅食算法求解认知无线网络频谱分配问题[J]. 计算机科学, 2013, 40(8): 49-52. 通讯作者: 许东
- [9] 安剑奇, 吴敏, 熊永华, 等. 高炉炉顶压力智能解耦控制方法及应用[J]. 信息与控制, 2010, 39(2): 180-186.
- [10] 李鹏, 孙未蒙, 李文强, 等. 一种改进积分滑模面在飞控中的应用[J]. 控制工程, 2010, 17(3): 269-289.

(收稿日期: 2015-02-16) EA