

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.04.011

改进的爬山算法在风电最大功率跟踪中的应用

邱 丽, 朱晓青, 郭百顺

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了最大限度地捕获风能, 提出了一种改进的变步长爬山搜索算法。分析了永磁直驱同步风力发电系统的风力机性能及永磁同步发电机的数学模型, 改进最大风能跟踪策略, 利用 Matlab/Simulink 软件搭建系统模型, 并对其进行仿真分析。仿真结果表明: 该控制算法不仅简单, 而且具有较高的风能利用效率, 能实现快速跟踪风速, 系统稳定性较好。

关键词: 风力发电系统; 最大功率跟踪; 爬山法

中图分类号: TM315

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)04-0057-04

Application of Improved Hill-Climbing Algorithm in Maximum Wind Energy Tracing

Qiu Li, Zhu Xiaoqing, Guo Baishun

(School of Electric and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to capture wind energy as much as possible, a maximum power point tracking control algorithm was proposed. The wind turbine performance of the direct-driven permanent magnet synchronous wind power system and the mathematical modeling of permanent magnet synchronous generator were analyzed and the maximum wind energy tracing strategy was improved. With Matlab/Simulink software, the entire system was simulated and researched. The results show that the algorithm is not only simple but also has high efficiency of utilizing wind energy, good tracking performance and good stability.

Keywords: wind power system; maximum wind energy tracing; hill-climbing method

0 引言

近年来, 由于化石燃料的成本增加、储备有限及其对环境的不利影响, 因此, 可再生能源被高度关注。其中, 风能是发展最快的可再生能源之一^[1], 具有随机性和不稳定性。变速风电系统一般采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)的控制策略, 其可以最大限度地捕获风能。MPPT控制策略有3种方法: 最佳叶尖速比控制^[2-3]、功率曲线法控制^[4-5]和爬山搜索法控制。最佳叶尖速比控制法

需要测量风速、转速, 由于风速的实时准确测量较为困难, 因此该方法实现起来比较困难; 功率曲线控制法需测量转速和发电机的输出功率, 还需知道风力机固有的最优功率曲线, 而这种曲线很难获得, 且对于不同的风轮机, 其最大功率曲线也不同; 爬山搜索控制法无需测风装置, 也不需要事先知道具体风轮机的功率特性, 而是施加人为的转速扰动, 然后通过测量功率的变化来自动搜索发电机的最优转速点。传统的爬山搜索法给控制量一个固定的步长扰动, 但该方法的调节速度往往滞后于风速变化,

收稿日期: 2013-04-25

作者简介: 邱 丽(1987-), 女, 福建龙岩人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为风力发电,

E-mail: ql19871989@126.com

不能兼顾系统的快速性和稳定性。因此,本文提出了一种改进的变步长爬山搜索控制法,利用 Matlab/Simulink 软件建立系统模型,仿真分析了其捕风效率、跟踪速度和稳定性。

1 永磁直驱风电系统机侧数学模型

1.1 风力机特性

根据 Betz 气动理论,风力与速度的平方成正比,功率是速度和力的乘积,所以功率与风速的三次方成正比^[6]。风力机从风中捕获的机械功率和输出转矩可以表示为:

$$P_m = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v^3 C_p(\beta, \lambda), \quad (1)$$

$$T_m = \frac{\pi \rho R^3}{2} \times \frac{C_p(\beta, \lambda) v^2}{\lambda}. \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度;

v 为风速;

R 为叶片长度;

叶尖速比 λ 是风轮叶尖速度与风速之比,其表征风轮在各风速段中的状态,即

$$\lambda = \omega_r R / v, \quad (3)$$

其中, ω_r 为风力机叶片旋转角速度;

$C_p(\beta, \lambda)$ 为风能利用系数,是叶尖速比 λ 和桨叶节距角 β 的非线性函数,可近似表示为

$$C_p(\beta, \lambda) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda, \quad (4)$$

其中, $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$ 。

保持 β 一定时,风能利用系数 C_p 只与 λ 有关系, C_p 与 λ 的关系曲线见图 1。

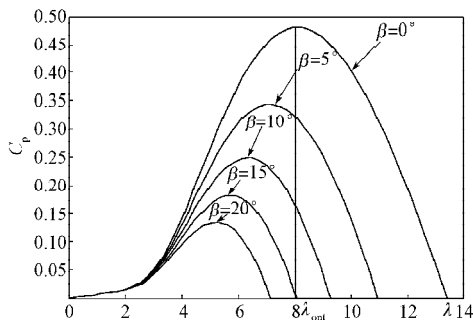


图 1 C_p 与 λ 的关系曲线图

Fig. 1 The C_p - λ characteristic curve

图中的凸点对应最大风能捕获点,其对应的 λ 为最佳叶尖速比 λ_{opt} ,同时 C_p 也为最大值 $C_{p,max}$ 。由于风能的随机性,导致 C_p 经常处于低效状态,而最大

功率控制的目的是当风速变化时,适时调整风机转速,使 C_p 处于或接近最大值,从而获得最大风能。

1.2 永磁同步发电机数学模型

在 d - q 同步旋转坐标系下,将 d 轴定向于转子磁场方向, q 轴超前 d 轴 90° ,则永磁同步发电机的磁链、电压方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f, \\ \psi_q = L_q i_q; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_d = R i_d - \omega_e \psi_q + p \psi_d, \\ u_q = R i_q + \omega_e \psi_d + p \psi_q. \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_d, u_q 为 d - q 轴电压;

i_d 和 i_q 为 d - q 轴电流;

R 为定子电阻;

ω_e 为发电机电角频率;

ψ_d, ψ_q 为发电机定子 d - q 轴磁链;

ψ_f 为转子永磁体磁链;

L_d, L_q 为 d - q 轴等效电感;

p 为微分算子。

整理式 (4) 和 (5) 可得:

$$\begin{cases} u_d = R i_d - \omega_e L_q i_q + p L_d i_d + p \psi_f, \\ u_q = R i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f + p L_q i_q. \end{cases} \quad (6)$$

电磁转矩为

$$T_c = \frac{3}{2} N_p [(L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q], \quad (7)$$

式中, N_p 为极对数。

对于隐极永磁同步电机,或者在运行过程中使定子电流的 d 轴分量始终为 0,则

$$T_c = \frac{3}{2} N_p \psi_f i_q. \quad (8)$$

可见,控制永磁同步发电机的电磁转矩,实际上就是控制定子电流的 q 轴分量,即转矩分量。

永磁同步发电机的运动方程为:

$$T'_m - T_c = J \frac{d\omega_m}{dt}, \quad (9)$$

$$\omega_e = N_p \omega_m. \quad (10)$$

式中: J 为转动惯量; T_c 为电磁转矩; T'_m 为机械转矩; ω_m 为发电机机械转速。

2 最大风能追踪控制策略

2.1 永磁直驱风力发电的机侧控制

永磁直驱风力发电机的机侧控制结构见图 2。

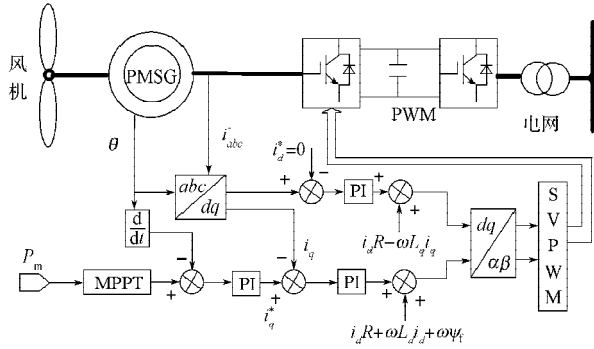


图2 永磁直驱风力发电机侧结构框图

Fig. 2 The block diagram for the side structure of permanent magnet direct-drive wind generator

由图可知,该控制结构采用转子磁链定向零 d 轴控制,即设定 $i_d^*=0$ 。该控制是将定子电流矢量位于 q 轴,而无 d 轴分量,即定子电流全部用来产生转矩。由式(8)可知,电磁转矩与 q 轴定子电流成正比,若要控制定子 d 轴电流为0,只需控制 q 轴定子电流就能实现对电磁转矩的控制。该控制系统采用转速外环、电流内环的双闭环控制结构,通过PI调节和电压前馈补偿得到参考电压指令,该指令通过电压空间矢量脉宽调制技术控制变换器中各开关管的通、断,以调节发电机定子电流,进而调节发电机的电磁转矩,最终实现对风电机组最大功率追踪。

2.2 改进的爬山算法

爬山搜索法分为固定步长爬山搜索法和变步长爬山搜索法。爬山搜索法的原理是:假设上个周期的风机功率为 $P(\omega-1)$,给转速一个扰动 d_ω 后,风机当前功率为 $P(\omega)$,将其与 $P(\omega-1)$ 进行比较,如果功率增大,则不改变转速指令的 d_ω 符号,如果功率减小,则改变 d_ω 符号,这样使得风机功率达到最大 P_G ,最后将上个周期的转速值加上当前的转速扰动值就是新的转速值。固定步长的爬山搜索法采用固定转速扰动值进行爬山搜索,不能同时兼顾系统的快速性和稳定性,而变步长的爬山搜索法可有效地解决这一问题。因此,本文采用变步长的爬山搜索法进行最大功率跟踪控制。

风力发电机的 $P-\omega$ 曲线见图3。

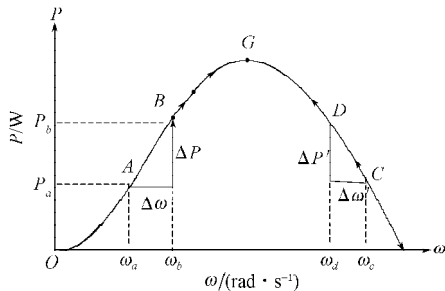


图3 风力发电机 $P-\omega$ 特性曲线

Fig. 3 The $P-\omega$ characteristic curve of wind turbine

图中, G 点为发电机最大功率工作点; $\Delta\omega$ 为 ω 值的变化步长,变化后的 ω_b 值减去变化前的 ω_a 值; ΔP 为 ω 值变化时所相对应的功率变化量,变化后的功率值 P_b 减去变化前的功率值 P_a 。

最大功率跟踪法的具体步骤如下:

1) 施加扰动。风电机组在一给定转速 ω 下稳定运行一段时间,假设在某风速下,风力机工作在 A 点施加一个扰动,到达 B 点, ω 增加一个步长 $\Delta\omega$, 功率也随之变化 ΔP 。

2) 对 ΔP 进行判断。如果 $\Delta P > 0$ 且数值较大时,则 $\Delta\omega$ 保持符号不变,继续增加一个步长 $\Delta\omega$, 直到 ΔP 数值较小时,再通过二分法对 $\Delta\omega$ 进行减半处理,直到 $\Delta P = 0$ 即运行在最大功率点上; 如果 $\Delta P < 0$ 时,则减小一个步长 $\Delta\omega$, 若变化之后的 $\Delta P < 0$, 需继续减小 ω , 直到 $\Delta P = 0$ 。

该方法可同时兼顾系统的快速性和稳定性,当输出功率离最大功率点较远时,增大扰动步长使转速迅速跟踪最佳转速,而当功率接近山顶时,减小扰动步长使转速平稳逼近最佳值。变步长爬山法的最大功率跟踪具体流程见图4。

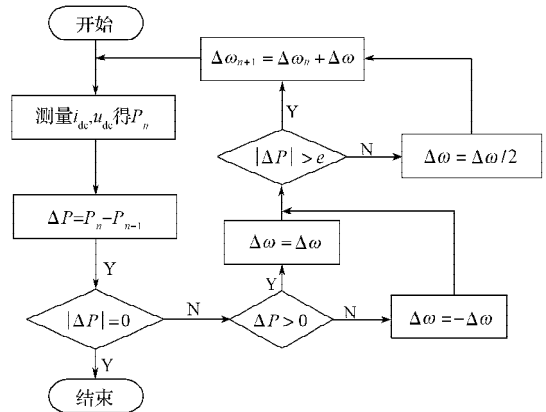


图4 算法流程图

Fig. 4 The algorithm flow chart

3 仿真结果及分析

利用 Matlab/Simulink 软件建立风力发电系统最大功率能追踪仿真模型,分析了变步长爬山法最大功率跟踪的性能。

永磁同步发电机的参数为: 定子电阻 $R_s=0.75 \Omega$, 电感 $L_d=0.00684 \text{ H}$, $L_q=0.00684 \text{ H}$, 极对数 $N_p=11$, 磁通幅值 $\psi_f=0.5173 \text{ Wb}$, 风轮半径 $R=6 \text{ m}$, 桨距角 $\beta=0^\circ$ 。系统模型测试时间为 30 s 。

风速变化曲线如图5所示。本文是在额定风速 9 m/s 下进行最大风能捕获,当风速超过额定风速时,调整发电机的转速到额定转速 300 r/min 。

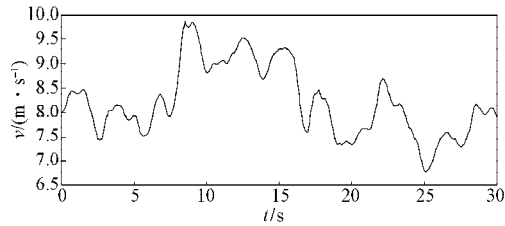


图5 风速变化曲线图

Fig. 5 The curve of wind speed variation

图6为风能利用系数的波形图。从图中可以看出,当风速变化时, C_p 波动较小,一直保持在0.45附近,这说明了该系统能较好地追踪风速,实现了最大风能捕获。

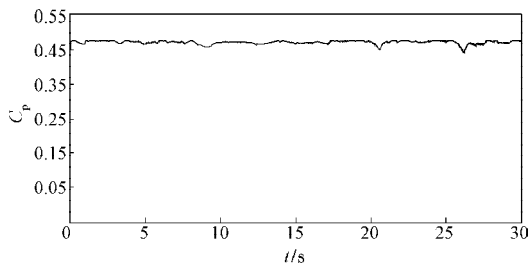
图6 风能利用系数 C_p 波形图Fig. 6 The waveform of power coefficient C_p

图7为电机转速波形图。从图中可以看出,电机转速能较好地跟随风速的变化而变化,当超过额定风速时,发电机的转速也稳定在300 r/min附近。

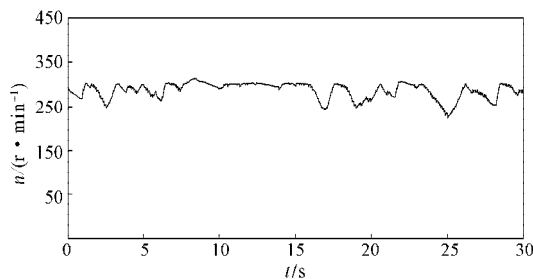


图7 发电机转速波形图

Fig. 7 The waveform of the generator speed

图8为电机的输出功率曲线图,从图中可以看出输出功率与风速的波形保持一致。

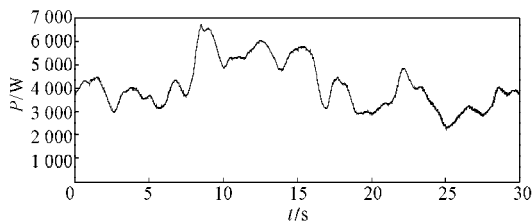


图8 电机输出功率波形图

Fig. 8 The waveform of the generator output power

差和跟踪速度慢等问题,提出了变步长的爬山算法。介绍了风力发电系统中风力机和永磁同步发电机的特性,将利用Matlab/Simulink软件搭好的仿真模型应用到风力发电系统中进行仿真分析。仿真结果表明,本文算法能较好地追踪风速,且系统对风能的利用率较高。

参考文献:

- [1] 吴斌. 风力发电系统的功率变换与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 1-3.
Wu Bin. Power Conversion and Control of Wind Energy Systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 1-3.
- [2] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.
Yin Ming, Li Genyin, Zhang Jiancheng, et al. Modeling and Control Strategies of Directly Driven Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-65.
- [3] Qiao Wei, Zhou Wei, Aller J M, et al. Wind Speed Estimation Based Sensorless Output Maximization Control for a Wind Turbine Driving a DFIG[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1156-1169.
- [4] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-111.
Zhao Rende, Wang Yongjun, Zhang Jiasheng. Maximum Power Point Tracking Control of the Wind Energy Generation System with Direct-Driven Permanent Magnet Synchronous Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 106-111.
- [5] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.
Liu Qihui, He Yikang, Zhang Jianhua. Operation Control and Modeling-Simulation of AC-Excited Variable-Speed Constant-Frequency(AEVSCF) Wind Power Generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 43-50.
- [6] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 11-13.
Ye Hangzhi. Control Technology of Wind Turbines [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 11-13.

(责任编辑: 邓彬)

4 结语

针对固定步长爬山搜索法所导致的系统稳定性