

基于改进爬山算法的风机最大功率点控制策略研究

田永贵,王 奔,薛禾雨,李 鹏,高鲁峰,李 晓
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要: 爬山搜索法是风力发电最大功率点的跟踪控制策略的主要方法之一。传统的爬山搜索法对于惯量大的风力发电系统,由于时间常数大使转速滞后,导致无法进行正确的搜索控制,因此,提出了改进变步长爬山搜索法,并与基于斜率变步长爬山搜索法做对比,仿真结果表明,改进之后的爬山搜索法对小型风电系统的最大功率点的跟踪有良好的效果,能够避免在风速稳定时的机械振荡和提高风能利用率。

关键词: 风力发电; 爬山搜索法; 最大功率跟踪; 变步长

Abstract: Climbing search method is one of the major methods on maximum power point tracking of wind power system. For the wind power system with large inertia, the traditional climbing search method cannot carry out the correct search control because of the rotating speed lag caused by large time constants. Therefore, an improved variable step climbing search method is proposed, and compared with the climbing search method based on slope. The simulation results indicate that the improved method has a good effect on maximum power point tracking of small wind power system, and it not only increases the utilization of wind energy, but also avoids the mechanical oscillations when wind speed is stable.

Key words: wind power generation; climbing search method; maximum power point tracking; variable step size

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0054-07

0 引 言

风力发电是可再生能源发电中发展速度最快、技术最成熟的一种发电方式,然而风电并网功率的波动性和间歇性会对电网的稳定性和电能质量产生重要影响^[1-3]。研究风力发电最大功率跟踪点控制成为了国内外学者研究的重要课题之一。

目前常见的最大功率点跟踪策略主要有 3 种方法: 叶尖速比法 (tip speed ratio, TSR)、功率信号反馈法 (power signal feedback, PSF)、爬山搜索法 (hill-climb searching, HCS)。文献 [4-6] 阐述了传统的叶尖速比法、功率反馈法、爬山法的 3 种控制策略,针对传统的 3 种最大功率点方法的缺点,很多学者提出了很多改进的控制策略。对于最大功率反馈法,文献 [7] 实时在线修正最大功率曲线的来保证最大功率点跟踪的精度,文献 [8-9] 考虑了风力机在运行中的动态过程风轮的储能以风轮为控制对象来减少过度时间。文献 [10] 分析了叶尖速比法中风速仪在不同地方对最大功率点跟踪的影响并提取了补偿机制来更精确地跟踪最大功率点。文献 [11]

中考虑风机的动态性能提出风速频率分离的双闭环直接控制来减小系统的机械振荡。文献 [12-13] 分别运用支持向量机和神经网络对有效风速估计和文献 [14-15] 基于线性和非线性系统中变量的状态进行最优转速估计来进行叶尖速比控制完成最大功率点的跟踪。文献 [16-18] 分别给出通过模糊控制、变增益的极值搜索、三点法的变步长爬山法,这些算法在最大功率的跟踪性能上比定步长爬山法优越。

不管哪种改进的爬山法都是考虑如何在搜索的过程中给出合适的步长使搜索时间短和造成的振荡小,针对这个问题,引用变斜率的变步长思想采用考虑 3 个时刻的采样对应的斜率关系给出搜索步长,旨在避免因为两个时刻的转速差接近于 0 时造成的搜索步长过大,而且在风速稳定的情况下可以实现停止扰动。

1 小型风力发电机组特性和数学模型

小型发电系统的拓扑结构如下图 1 所示。本节根据小型风力发电系统的各个组成部分特性进行分析,并建立了风力机、传动链、三相异步电机、变流

器的数学模型。

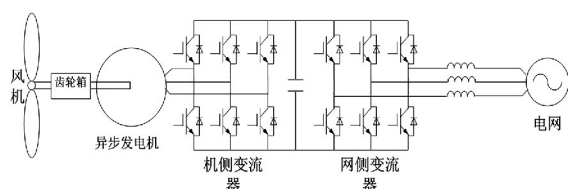


图 1 小型风力机拓扑结构

1.1 风力机特性

风力机是一个风能利用装置,因此,功率随风速变化而变化是风力机性能的主要指标。当气流流过风机时,就会产生一个与本地气流流动方向垂直的气动力,叶片因此带动风轮运转,并将风能转化为机械能。风力机主要特性包括以下 3 个部分^[19]。

1.1.1 叶尖速比与风能利用系数

根据空气动力学基本原理得,风力机捕获的功率可以表示为

$$\begin{cases} P_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \\ C_p = 0.22 \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_p 为风能利用系数; ρ 为空气密度, Kg/m^3 ; R 为风轮半径, m ; V 为风速; β 为桨距角。

由式(1)可得:在风速和密度不变的条件下,风力机的输出功率与 C_p 成正比关系。其中 C_p 为叶尖速比 λ 和 β 的函数。 λ 可以表示为

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (2)$$

式中, Ω 为风轮角速度。

因此, C_p 与 λ 的关系体现了风力机的转换效率。图 2 为风力机的 $C_p - \lambda$ 关系曲线,由图 2 可知:当风速一定时,叶尖速比不同其转换效率也不同,对于一个特定的风机只存在一个 λ_{opt} 使得 C_p 取得最大值。

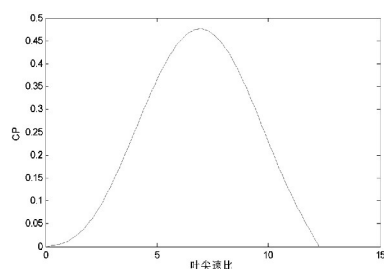


图 2 风力机 $C_p - \lambda$ 关系曲线

1.1.2 最大功率曲线

在桨距角一定时,将式(2)带入式(1)得

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \Omega^3 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可知:在同一风速下随着风轮转速不同,风力机输出的功率也不同,但是存在一个转速使得风力机的输出功率最大,此时对应的点称为最大功率点,如图 3 中的 A 点,把不同的风速下风力机的输出功率曲线簇中的最大点连接起来就得到了一条最大功率曲线。

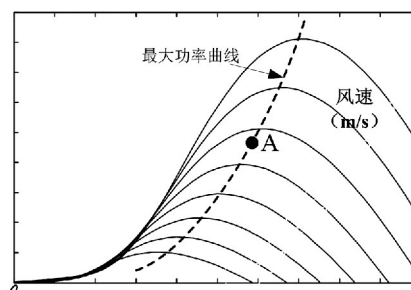


图 3 风机最大输出功率曲线

1.2 传动链数学模型

传动系统作为风力发电机组的重要组成部分,其作用使风力机捕获的风能传递给发电系统。但是风力机的转速慢导致发电机无法达到切入转速,这样必须经过齿轮箱的升速来提高发电机的转速。图 4 为单质量模块的简图。

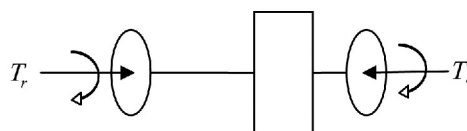


图 4 传动链单质量模块简图

由图 4 可知 T_r 为输入量, T_g 为输出量,其传动动态模型^[20]为

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = T_r(\Omega_r, \rho) - \frac{i}{\eta} T_g(\Omega_g) - B\Omega_r \quad (4)$$

$$J = J_r + J_l + \frac{I^2}{\eta} (J_h + J_g) \quad (5)$$

式中, J 为机组总惯量; B 为传动系统阻尼; J_r 为风轮转子转动惯量; J_l 为低速轴惯量; J_h 为高速轴惯量; J_g 为发电机转子转动惯量; I 为齿轮箱变速比。

1.3 三相异步发电机数学模型

三相异步电机是一个多变量、非线性、强耦合的

系统。在研究其动态数学模型时常作如下假设。

(1) 三相绕组对称, 在空间的电角度相差 120° , 磁动势延气隙周围正弦分布;

(2) 忽略磁饱和, 各绕组的自感与互感都是恒定的;

(3) 不计铁心损耗;

(4) 不考虑温度对绕组的阻值影响。

则三相异步电机在 d 、 q 坐标下的数学模型^[21]

为

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{V_{sd}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{sd} - \frac{L_m}{L_s} \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_s (i_{sq} + \frac{L_m}{L_s} i_{rq}) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{V_{sq}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{sq} - \frac{L_m}{L_s} \frac{di_{rq}}{dt} - \omega_s (i_{sd} + \frac{L_m}{L_s} i_{rd}) \\ \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_{rd} - \frac{L_m}{L_r} \frac{di_{sd}}{dt} + (\omega_s - \omega) (i_{rq} + \frac{L_m}{L_s} i_{sq}) \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_{rq} - \frac{L_m}{L_r} \frac{di_{sq}}{dt} - (\omega_s - \omega) (i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} i_{sd}) \end{cases} \quad (6)$$

电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} p \cdot L_m (i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (7)$$

令

$$\begin{cases} x = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)] = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}] \\ u = [V_{sd} \ V_{sq}] \end{cases}$$

为状态矢量和输入矢量。

则 SCIG 的模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = A(\Omega_h) \cdot x + B \cdot u \\ y = \frac{3pL_m}{2} (x_2 x_3 - x_1 x_4) \end{cases} \quad (8)$$

2 最大功率点跟踪控制策略

2.1 最大功率点跟踪原理

风力发电最大功率点的跟踪就是控制风力机运行在最大功率曲线上, 由风力机特性可知: 处于这条线上的点, 其转速与风速为最佳叶尖速比关系。当风速变化时调节风轮转速为最优转速 Ω_{opt} , 将叶尖速比维持在 λ_{opt} 处。根据式 (1), 此时风能利用系数为最大值 C_{pmax} , 使风力机捕获功率最大。

2.2 最大功率点跟踪策略

目前常见的最大功率点跟踪策略主要有 3 种方法: 叶尖速比法 (TSR)、功率信号反馈法 (PSF)、爬山搜索法 (HCS)。这里主要是研究爬山搜索法, 并将改进的爬山搜索法与传统的基于斜率变步长爬山

搜索法进行了对比。

2.2.1 爬山搜索法

爬山搜索法是为了克服前两种算法的缺点提出来的, 是通过搜索的方式来找到当前风速的最大功率点。该跟踪策略主要依靠当前的工作点位置和电机功率、电机转速。通过计算得到期望的搜索信号, 经过 PI 控制器得到电磁转矩使风力机转速改变, 反复执行上述过程直到达到最大功率点, 图 5 为控制原理图。

算法的优点: 需要的系统信息少, 不需要知道具体的 $C_p - \lambda$ 关系, 只需要知道采样每个时刻的电机转速和功率值。

算法的缺点: 对于惯量大的风力发电系统, 由于时间常数大使转速滞后, 导致无法进行正确的搜索控制。

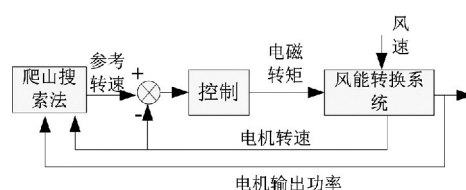


图 5 爬山搜索法

2.2.2 基于斜率的变步长爬山法

基于变斜率的最大功率点跟踪算法是根据输出功率与转速为一凸函数, 有且只有一个极值点, 利用斜率变化的大小来决定搜索步长的大小, 图 6 所示为小型风发电系统的 $P - \omega$ 曲线, 可得: 在离最大功率点较远的地方, $\Delta\omega$ 对应的发电机的输出功率变化较大, 在离最大工作点附近时, 发电机的转速变化 $\Delta\omega$ 对输出功率影响较小。即在功率曲线上每个工作点对应的斜率也不一样, 在一固定风速下在图中 a 、 b 、 c 分别作切线, 其中

$$\left| \frac{dP_{k1}}{d\omega} \right| < \left| \frac{dP_{k2}}{d\omega} \right| < \left| \frac{dP_{k3}}{d\omega} \right|$$

在最大功率点 b 时 $\frac{dP_{k1}}{d\omega} = 0$ 。当采样时间很小时, 两个采样时刻的差可以近似地认为 $\Delta\omega = d\omega$ 。

同理输出的功率 ΔP 也一样, 得到 $\frac{dP}{d\omega} = \frac{\Delta P}{\Delta\omega}$ 。带斜率

因素的改进步长算法由式 (9) 确定搜索步长。

$$\begin{cases} \Delta\omega(k+1) = K_{MPPT} \frac{\Delta P(k)}{\Delta\omega(k)} \\ \frac{\Delta P(k)}{\Delta\omega(k)} = \Delta D \end{cases} \quad (9)$$

式中 K_{MPPT} 为步长调节系数, 一般由实验和仿真结果得到。

该算法理论上能够有效克服定步长爬山法的缺点,当斜率大的时候给出较大的搜索步长,当斜率小时搜索步长也变小,从而实现了变步长的跟踪控制。这样可以较快地搜索到最大功率点,而且在最大功率点附近产生的机械系统振荡小。

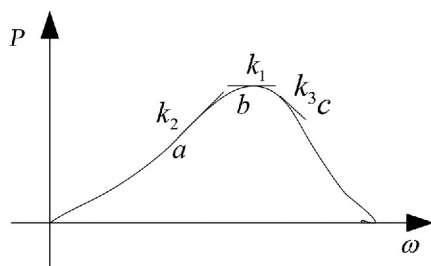


图 6 风力机 $p-\omega$ 曲线
算法流程图如图 7 所示。

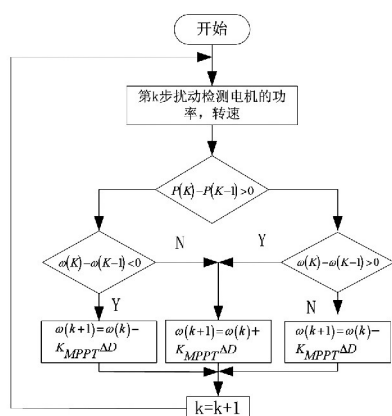


图 7 基于斜率的变步长算法流程图

2.2.3 改进的变步长爬山法

由上面所阐述的,基于斜率改进的变步长虽然引入了变的策略,但是其比例因子 K_{MPPT} 的选择是个难题,选择过大的值造成爬山搜索过程步长一直保持一个比较大的值,选择较小的值时,搜索步长会一直处在一个很小步长特别是在最大功率点附近的地方会造成搜索时间长,而且在实际采样的过程中由于惯性转速的变化不会太快或者是其他干扰因素使两个时刻采样的差值 $\Delta\omega$ 可能很小或者是接近于 0。由式:

$$\Delta\omega(k+1) = K_{MPPT} \frac{\Delta P(k)}{\Delta\omega(k)}$$

可得:因为 $\Delta\omega$ 很小而且无论 ΔP 是大还是小,那么下一时刻给定搜索步长 $\Delta\omega(k+1)$ 一定很大,这样一个错误的步长对下一时刻的步长也会造成连锁反应。

为了进一步提高最大功率点跟踪的速度和精

度,根据上面变步长爬山法的思想对爬山搜索算法进行改进。改进的爬山法依然是通过主动去扰动转速来实现。改进的爬山法原理如下。

如图 8 所示:在爬山搜索过程中,采样周期很短,在同一功率曲线下两个时刻的斜率应该近似相等。如式(10)所示。

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta\omega_1} = \frac{\Delta P_2}{\Delta\omega_2} \quad (10)$$

电机的输出功率可以表示为

$$P = T_e \cdot \omega \quad (11)$$

对式(11)求导得

$$\frac{dP}{dt} = \omega \frac{dT_e}{dt} + T_e \frac{d\omega}{dt} \quad (12)$$

系统的切入转速为 50 rad/s,由式(12)可知电机的功率变化 ΔP 值相对于转速的变化 $\Delta\omega$ 的值较大,能够很快地反映出风速的变化,所以利用 ΔP 的信号去给出搜索步长,为了避免基于斜率变步长爬山法中由于 $\Delta\omega$ 过小会造成 $\frac{\Delta P}{\Delta\omega}$ 值很大问题,将式(10)变为

$$\Delta\omega_2 = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \cdot \Delta\omega_1 \quad (13)$$

连续检测 ΔP 、 ΔP_2 和 $\Delta\omega_1$ 值如图由图 8 中 A 区所示,由式(13)得到下一时刻的搜索步长为 $\Delta\omega = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \cdot \Delta\omega$ 。当检测到 ΔP_2 的值都小于一个阈值 ε_1 且 $\Delta P_1 \cdot \Delta P_2 > 0$,表明此时的工作点在最大功率点附近并且正在靠近最大功率点。由图 8 中 B 区可知:连续检测到的 ΔP_1 、 ΔP_2 都很小,如果按式(13)给出的步长很小,则无法满足系统的快速性,为了解决这个问题引入了黄金分割比例因子。此时的搜索步长为。

$$\begin{cases} \Delta\omega = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \cdot \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega = \Delta\omega / 0.618 \end{cases}$$

通过对搜索步长放大能够快速靠近并越过最大功率点。当 ΔP_2 检测都小于一个 ε_2 时,给出的搜索步长为 0,认为此时已经搜到最大功率点,如图 8 中 C 区所示。进而完成了在风速一定的情况下搜索到最大功率点并实现停止功能,来避免在最大功率点时由主动扰动造成的机械系统损害。重启过程根据连续检测 ΔP_1 、 ΔP_2 的值来判定,如果检测到 $\Delta P_1 = 0$ $\Delta P_2 \neq 0$ 时判定系统重新给出搜索步长,若

$\Delta P_1 = 0$ $\Delta P_2 = 0$ 则判定风速没有改变, 搜索步长为 0。改进的爬山法流程图如图 9 所示。

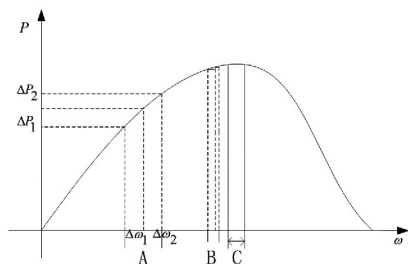


图 8 改进爬山法的原理图

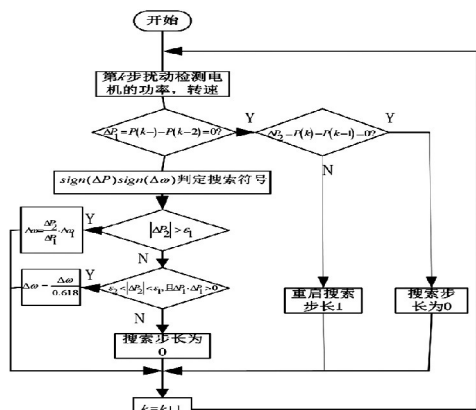


图 9 改进的变步长爬山法流程图

3 仿真结果

基于 Matlab/Simulink 的仿真总体框图如图 10 所示: 其中被控模块为风力机子模块和电机子模块, 控制模块为电机转速控制模块、电机矢量控制模块、MPPT 爬山法控制模块。MPPT 模块根据寻优策略给出电机的参考转速, 作为转速控制模块的输入, 然后经过 PI 控制器输出相应的参考电磁转矩, 最后经过矢量控制策略得到三相交流电压, 驱动电机。由于为了验证改进爬山算法的优越性, 选定了在理想风速下, 对基于变斜率爬山算法和改进爬山算法进行对比。

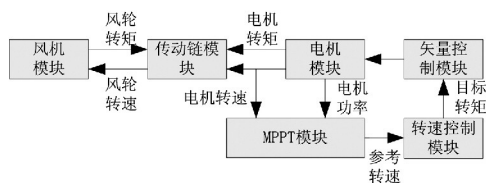
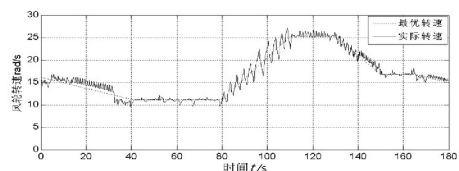


图 10 小型风机总体仿真框

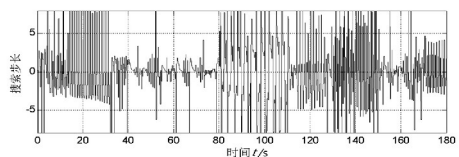
3.1 基于斜率的变步长爬山法仿真

根据图 7 的流程图设计算法, 其中搜索步长由式 (9) 中 $\Delta\omega(k+1) = K_{MPPT} \frac{\Delta P(k)}{\Delta\omega(k)}$ 给出, 其中搜索步

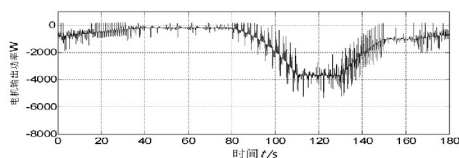
长的最大值为 8。分别给出 $K_{MPPT} = 0.1$ 、 $K_{MPPT} = 0.5$ 的仿真结果, 如图 11(a)、(d)、(e)、(h) 所示, 两种情况下都能实现最大功率点的跟踪, 在 $K_{MPPT} = 0.5$ 时风能利用系数比 $K_{MPPT} = 0.1$ 时高。由图 11(b) 和 (f) 可知: 在比例系数为 0.1 时搜索步长会一直以一个比较小的步长去搜索, 当比例系数放大为 0.5 时, 在相同的风速下得到的搜索步长会整体放大, 其值很容易就达到步长的限幅值 8。从图 11(c) 和 (g) 可以看出电机的输出功率在最大功率点附近的振荡会随着比例系数的增大而增大。同时不管 K_{MPPT} 取值的大小, 从结果 (这里没有加入转速干扰的条件下) 中可以看出在风速 (60 ~ 100 s) 恒定的情况下, 该算法的搜索步长有时也会达到限幅值, 这样一个错误的步长会影响下一个时刻搜索步长正确性。所以可以得出在 K_{MPPT} 较小时, 搜索步长一直比较小无法快速精确地跟踪风速变化, 随着 K_{MPPT} 的增大虽然能够快速跟踪风速的变化, 但该方法会越来越接近于一个固定的大步长爬山法, 那么也会造成比较大的电磁转矩振荡, 失去了变步长爬山法的意义。



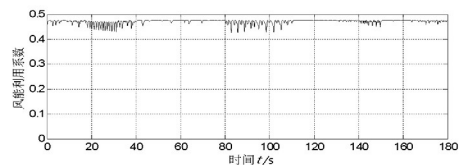
(a) 步长系数为 0.5 的风轮转速



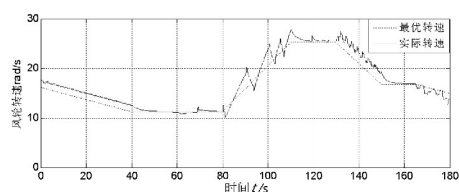
(b) 步长系数为 0.5 时搜索步长



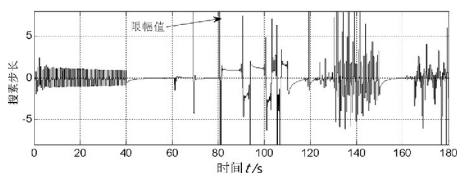
(c) 步长系数为 0.5 时电机输出功率



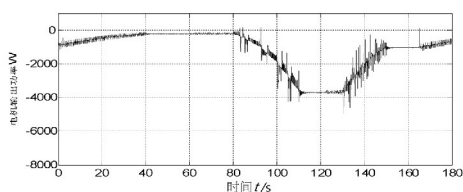
(d) 步长系数为 0.5 时风能利用系数



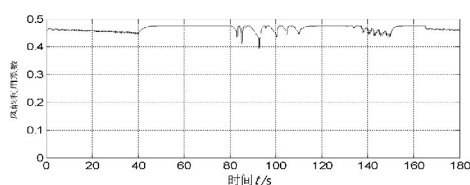
(e) 步长系数为 0.1 时风轮转速



(f) 步长系数为 0.1 时搜索步长



(g) 步长系数为 0.1 时电机输出功率



(h) 步长系数为 0.1 时风能利用系数

图 11 基于斜率变步长 MPPT 仿真结果

3.2 基于改进爬山算法仿真

改进的爬山法同样是变步长的爬山法,与前两种变步长算法相比该算法实现了停止功能。同样根据流程图 9 设计控制算法,改进的变步长 MPPT 模块如图 12 所示。

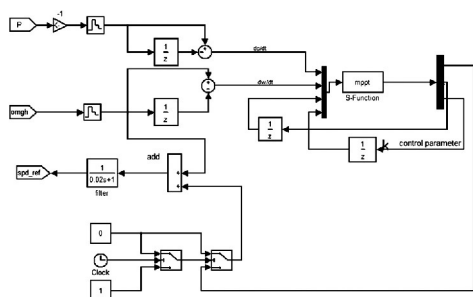
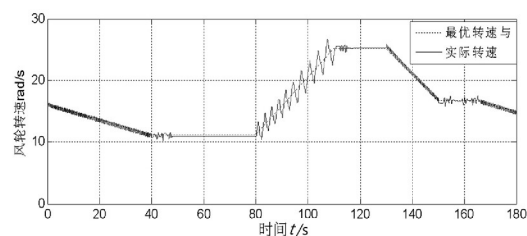
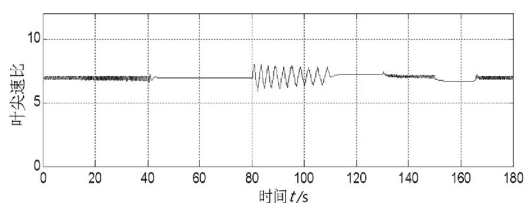


图 12 改进变步长的 MPPT 仿真图

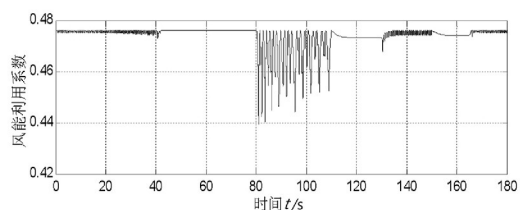
采用图 9 变步长爬山搜索策略,其中设定阈值 $\varepsilon_1 = 1$ $\varepsilon_2 = 50$ 步长最大值为 4。结果如图 13 所示:从仿真结果图(a)、(b)和(c)可以看出该算法能够很快而且精确地跟踪最佳转速保持很高风能利用效率,在风速稳定的情况下(40~80s、110~130s、150~170s)



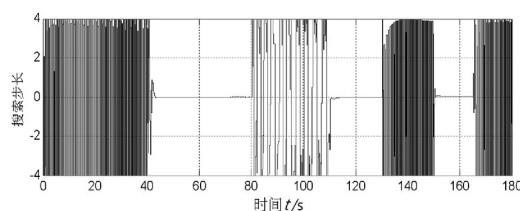
(a) 风轮转速与最优转速



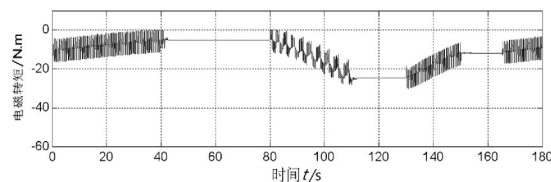
(b) 叶尖速比



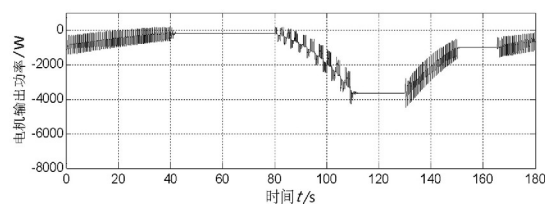
(c) 风能利用系数



(d) 搜索步长



(e) 电磁转矩



(f) 电机输出功率

图 13 改进变步长 MPPT 仿真结果

实现停止功能。从图(d)中可以看出改进的策略在风速变化时给出了比较合适的搜索步长,使得电磁转矩的振荡减小,电机的输出功率相对平滑,如图(e)和(f)所示。虽然该算法停止搜索时,实际转速与最优转速存在一个小的误差,但是该策略避免了由于主动扰动产生的机械振荡。

通过对图 11、图 13 的结果分析可以得出:在理想风速情况下,基于斜率的变步长爬山法在搜索过程中,存在搜索步长容易出现错误的缺点。改进的爬山法能够比较好完成最大功率点的跟踪任务,使风轮转速接近最优转速,保持比较高的风能利用系数和风能捕获效率,其中改进的爬山法在风速稳定时实现了停止,解决了爬山法由于主动扰动造成机械振荡的问题。

4 总 结

针对当前小型风电系统中最大功率点跟踪存在问题:在增加风能捕获效率的同时会影响系统的使用寿命,即能量捕获效率和机械振荡的矛盾,介绍了变速恒频的风力发电系统常用的 3 种最大功率点跟踪策略,即爬山法,并阐述了爬山法存在的缺点,在这个基础上分析了基于斜率变步长爬山法,针对它的缺陷给出了一种改进的变步长爬山法:采用连续采样三点的信息,通过两个相邻的斜率相近给出搜索步长,并实现停止功能。

通过分析小型风力发电系统各个组成部分的数学模型,在 Matlab 中完成系统模型的搭建。在理想风速条件下对斜率变步长和改进变步长爬山法两种搜索策略进行仿真,仿真结果验证了两种策略的基本理论。通过对比,改进的变步长爬山法在系统要求的快速性和稳定性上有良好的效果。

参考文献

- [1] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
- [2] 裴哲义,董存,辛耀中. 我国风电并网运行最新进展[J]. 中国电力, 2010(11): 78-82.
- [3] 李善颖,石庆鑫. 大规模风电场并网运行无功补偿研究[J]. 中国电力, 2010, 43(9): 71-74.
- [4] Munteanu I. Optimal Control of Wind Energy Systems: towards a Global Approach[M]. Springer, 2008.
- [5] 程启明,程尹曼,汪明媚,等. 风力发电系统中最大功率点跟踪方法的综述[J]. 华东电力, 2010, 38(9): 1393-1399.
- [6] Abdullah M A, Yatim A H M, Tan C W, et al. A Review of Maximum Power Point tracking Algorithms for Wind Energy Systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 3220-3227.
- [7] 程显忠. 风力发电试验系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [8] Narayana M, Putrus G A, Jovanovic M, et al. Generic Maximum Power Point Tracking Controller for Small-scale Wind Turbines[J]. Renewable Energy, 2012(44): 72-79.
- [9] 夏安俊,胡书举,许洪华. 风电机组 MPPT 动态功率曲线控制策略的研究[J]. 电气传动, 2011, 41(12): 61-65.
- [10] Ciprian V. MPPT Algorithm for Small Wind Systems Based on SpeedControl Strategy[J]. Annals of Dunarea de Jos 2008, 31(1): 23-28.
- [11] Munteanu I, Cutululis N A, Bratcu A I, et al. Optimization of Variable Speed Wind Power Systems Based on a LQG Approach[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(7): 903-912.
- [12] Lin W M, Hong C M, Cheng F S, et al. MPPT Control Strategy for Wind Energy Conversion System Based on RBF Network[C]//Energytech, 2011 IEEE. IEEE, 2011: 1-6.
- [13] Abo-Khalil A G, Lee D C. MPPT Control of Wind Generation Systems Based on Estimated Wind Speed Using SVR[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008, 55(3): 1489-1490.
- [14] Rocha R. A sensorless Control for a Variable Speed Wind Turbine Operating at Partial Load[J]. Renewable Energy, 2011, 36(1): 132-141.
- [15] Boukhezzer B, Siguerdidjane H. Comparison Between Linear and Nonlinear Control Strategies for Variable Speed Wind turbines[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(12): 1357-1368.
- [16] 肖运启,徐大平,吕跃刚. 双馈风电机组一种新型模糊最大风能追踪控制[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(6): 1-7.
- [17] 纪志成,朱芸,孟涛. 风能转换系统的 MPPT 变增益极值搜索控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 414-418.
- [18] 黄守道,余峰,黄科元. 三点比较法在风力发电系统中的应用[J]. 控制工程, 2009, 16(6): 764-767.

(下转第 72 页)

R_g 和 L_g 的大电网通过断路器 BRK 接于 PCC, 负荷也接于 PCC。断路器 BRK 在 $t = 3$ s 时断开, 在 $t = 7$ s 时重新合上。

仅从理论上分析应该得到的仿真波形。对于 82 kW 的负荷 P_{ref} 设为 100 kW 恒定值, 电压稳定在 1.1 p. u. 附近, 负荷的有功功率自动调节为 100 kW。当采用正斜率时, 电压和有功功率将跳变比为 1.1 p. u. 和 100 kW 更大的值, 对应的 D 点。当斜率为负时, 电压和有功功率将低于 1.1 p. u. 和 100 kW 相当于对应的 D' 点。所以, DG 的 $P-V$ 特性斜率为正时能减小不可检测区, 斜率为负时将增大不可检测区。

对于 100 kW 的负荷, 3 个 DG 的 $P-V$ 特性曲线的电压和有功功率稳定在 1.1 p. u. 和 100 kW 相当于点 E 和点 M。OVP/UVF 方法在这样的条件下将很难检测出孤岛情形。当采用正斜率时, 电压和有功功率将跳变比为 0.88 p. u. 和 100 kW 更小的值, 对应的 C 点。当斜率为负时, 电压和有功功率将略大于 0.88 p. u. 和 100 kW 相当于对应的 C' 点。同样的, DG 的 $P-V$ 特性斜率为正时能减小不可检测区, 斜率为负时将增大不可检测区。对于 129 kW 的负荷条件下也有同样的结论。

所以, 理想的仿真波形应该是能支持所提的改进后的 OVP/UVF 孤岛检测方法。调节 DG 的 $P-V$ 特性曲线斜率为正能减小 OVP/UVF 孤岛检测方法的不可检测区, 调节 DG 的 $P-V$ 特性曲线斜率为负将增大 OVP/UVF 孤岛检测方法的不可检测区。

4 结 论

孤岛情况可能会对电力系统和运行检修人员产生极大的危害, 因此, 必须重视并逐步完善孤岛检测

方法。首先分析了孤岛形成的原因, 目前孤岛检测方法分类以及各种方法的原理和优缺点。所研究的方法主要对 OVP/UVF 方法进行了改进。通过修正 DG 的 $P-V$ 特性曲线的斜率来减小 OVP/UVF 方法的不可检测区。当 DG 的 $P-V$ 特性曲线斜率为正时, 能有效减小 OVP/UVF 方法的不可检测区; 当 DG 的 $P-V$ 特性曲线斜率为负时, 反而会增大 OVP/UVF 方法的不可检测区。当斜率为额定运行点(电压为 1 p. u., 功率为额定功率 100 kW)的切线时, 不可检测区可以控制到最小。

参考文献

- [1] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 丁磊. 多微网配电系统的分层孤岛运行及保护控制 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [3] 伞国成, 赵清林, 郭小强, 等. 光伏并网逆变器的间歇性频率扰动正反馈孤岛检测方法 [J]. 电网技术, 2009, 33(11): 83-86.
- [4] 程明, 张建忠, 赵俊杰. 分布式发电系统逆变器侧孤岛检测及非检测区描述 [J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 44-52.
- [5] 姚丹. 分布式发电系统孤岛效应的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [6] 殷桂梁, 孙美玲, 肖丽萍. 分布式发电系统孤岛检测方法研究 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(1): 1-6.
- [7] 褚小莉. 光伏并网中的孤岛效应研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [8] 曾议. 分布式并网发电系统孤岛检测研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

作者简介:

伍 盛(1981), 国网德阳供电公司, 工程师。

(收稿日期: 2014-07-21)

(上接第 60 页)

- [19] Pucci M, Cirrincione M. Neural MPPT Control of Wind Generators with Induction Machines without Speed Sensors [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 58(1): 37-47.
- [20] Welfonder E, Neifer R, Spanner M. Development and Experimental Identification of Dynamic Models for Wind Turbines [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(1): 63-73.

- [21] Leonhard W. Control of Electrical Drives [M]. Springer, 2001.

作者简介:

田永贵(1988), 硕士研究生, 研究方向为风力发电、非线性变结构控制;

王 奔(1960), 博士, 教授, 研究方向为电力系统非线性变结构控制与电能质量控制。

(收稿日期: 2014-07-07)