

小型直驱式永磁同步发电机最大功率跟踪研究

根据最大功率点跟踪的基本原理及常用风力发电控制系统的特点,详细分析了风机功率曲线与Boost变换器占空比之间的关系,指出了固定步长扰动占空比法追踪最大功率时的缺点,提出一种梯度式变步长扰动占空比法。在Matlab环境下,建立了基于Boost变换器的离网小型永磁直驱式风力发电模型。仿真结果表明,梯度式占空比扰动法能够快速有效地追踪到最大功率,且具有很好的动态特性和稳态特性。

田录林 王武兴/西安理工大学水利水电学院

0 引言

近年来,风能作为一种清洁可再生能源,得到较快发展。离网小型风电性价比、灵活方便,在偏远地区、电网未覆盖地区,有着潜在的发展空间^[1]。直驱式风电机组具有效率高、故障率低和运维成本低等优点,近年来,直驱风电机组装机呈现快速增长的势头^[2]。由于风能的随机性,为了获得最大发电效率,需要对其进行最大功率跟踪控制^[3]。

国内外研究已经对最大功率跟踪作出了大量研究,MPPT是风机在额定风速以下的主要运行策略,主要的MPPT方法有叶尖速比、扰动观察等方法。最佳叶尖速比法响应速度快、MPPT效率高,但由于其稳定性相对较差,且依赖于风速的精确测量,工程实践中应用较少。扰动观察法不需要测风装置,也无须复杂的功率计算,减小了机组成本,但是在最大功率点附近会有波动,会引起系统震荡。文献[4]提出依据风速的大小对风机进行分段控制的思想,使风力机组

一直保持在与当前风速相对应的最大输出功率状态下运行,但控制算法计算有些复杂。文献[5]提出了叶尖速比控制法和爬山搜索法相结合的改进型算法,该算法能够实现最大功率快速而精确的跟踪,但稳定运行时功率有波动。文献[6]提出一种新的变步长爬山法,在最大功率点附近,功率波动小于一定值时停止搜索,该算法可以提高系统的动态响应和稳态特性,但在文中并未指明功率波动小于的具体值。

本文在分析了固定步长扰动占空比的缺点的基础上,提出了梯度式变步长算法,并在Matlab/Simulink中搭建了基于Boost电路的离网小型直驱式永磁同步发电机模型。仿真证明,新算法能够快速有效地追踪到最大功率点。

1 风机特性

根据空气动力学理论,风机叶片吸收的风能转变为输出功率 P_m 具有如下函数关系^[7],即

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

式中, ρ 为空气密度,kg/m³;R为风轮机半径,m; λ 为叶尖速比; β 为桨距角(°);V为风速,m/s; C_p 为风能利用系数。

C_p 、 λ 可分别描述如下,即

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$



田录林/教授

关键词/Keywords

最大功率跟踪 ·
Boost变换器 ·
占空比扰动法 ·
永磁直驱式风力发电 ·

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V} \quad (4)$$

式中, ω_m 为风机的角速度。

图1为风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 的曲线, 根据贝茨理论, C_p 的极限值为0.593。由图1可以看出, 当桨距角 β 一定时, 风机的输出功率有且仅有一个最大值, 此时对应一个特定的叶尖速比称之为最佳叶尖速比 λ_{opt} , 风机运行在最佳转速 ω_{opt} , 风能利用系数最大。由式(1)~式(4)可知, 在风速给定的情况下, 风轮获得的功率将取决于风能利用系数。自然界的风速是时刻变化的, 如果风机的转速不能跟随风速的变化而变化, 则风机就不能捕获到最优输出功率。因此, 当风速变化时, 通过调节发电机转速, 进而改变风机转速, 使其叶尖线速度与风速之比保持在 λ_{opt} 恒定, 就可获得最佳的风能利用系数, 从而获取最大输出功率。这就是额定风速下变速风力发电机组最大功率跟踪控制原理。

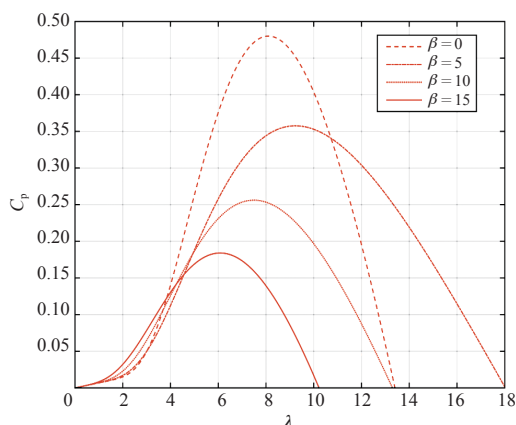


图1 某风机性能曲线

2 最大功率跟踪系统的设计

2.1 基于Boost占空比的最大功率跟踪原理

基于Boost占空比的最大功率跟踪发电系统框图如图2所示, 系统包括风机、永磁同步发电机、三相整流桥和Boost变换器。通常DC-AC应该连接于DC-DC变换器的输出, 在此简化为一个负载, 下面结合该系统分析MPPT运行的原理。

发电机的动态方程可表示为

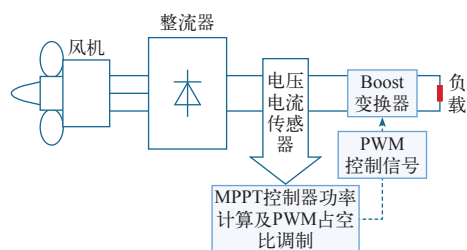


图2 风力发电系统框图

$$\omega'_m = \frac{T_m - T_e}{J} = \left(\frac{P_m}{\omega_m} - \frac{P_e}{\omega_e} \right) / J \quad (5)$$

式中, T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; P_e 为发电机输出功率; ω_e 为发电机角速度; J 为机械转动惯量。

Boost变换器的拓扑结构如图3所示。DC-DC变换器输入输出关系为

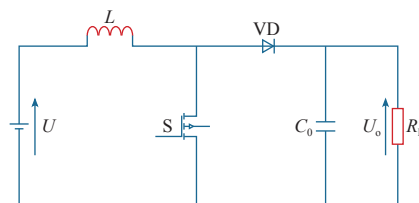


图3 Boost变换器拓扑结构

$$U_o = \frac{1}{1-D} U \quad (6)$$

故

$$P_e = \frac{1}{(1-D)^2} \frac{U^2}{R_L} \quad (7)$$

式中, U 、 U_o 为变换器输入电压输出电压; R_L 为虚拟负载; D 为变换器占空比。

由式(5)~式(7)可以看出, 当占空比减小时, P_e 也随之减小, 此时输入功率大于发电机输出功率, 其转速增加; 反之, 当占空比增加时, P_e 随之增加, 此时输入功率小于发电机输出功率, 其转速减小。因此, 可通过控制占空比进而实现最大功率跟踪。

图4为某风速下风机输出功率与转速的关系图, 如不考虑系统损耗, 那么机械功率 P_m 等于输出功率 P_e 时, 即 $\Delta P_e / \Delta \omega_e = 0$ 处为最大功率处。根据文献[8]可知, 此处 $\Delta P / \Delta D = 0$ 。

因此, 通过寻求 $\Delta P_e / \Delta \omega_e = 0$ 来追踪最大功率点就被转化为寻求 $\Delta P / \Delta D = 0$ 的方法。

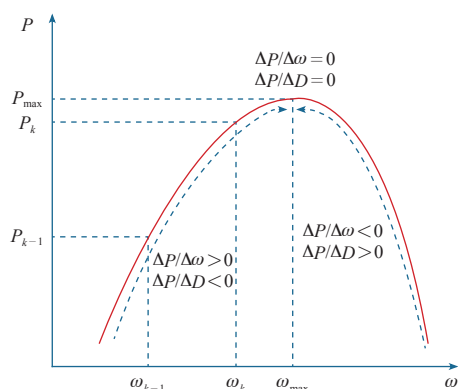


图4 风力机输出功率与转速的关系

2.2 固定步长扰动占空比原理

假设风速不变,在 $k-1$ 时刻风机输出的功率为 P_{k-1} ,转速为 ω_{k-1} ,调节变换器的占空比,则 k 时刻风机的输出功率和转速分别为 P_k 、 ω_k 。对照图4的 $P-\omega$ 曲线和占空比的关系,则 $k-1$ 时刻的功率和转速与 k 时刻的功率和转速会存在以下四种情况。

1) $P_k > P_{k-1}$ 且 $\omega_k > \omega_{k-1}$,这表明此刻风机运行在最大功率点的左侧,由于 $\omega_k > \omega_{k-1}$,说明PWM的占空比在减小,所以应继续减小PWM占空比直到风机运行在最大功率点上。

2) $P_k < P_{k-1}$ 且 $\omega_k > \omega_{k-1}$,这表明此刻风机运行在最大功率点的右侧,由于 $\omega_k > \omega_{k-1}$,说明PWM的占空比在减小,所以应增加PWM占空比,降低转速,直到风机运行在最大功率点上。

3) $P_k > P_{k-1}$ 且 $\omega_k < \omega_{k-1}$,这表明此刻风机运行在最大功率点的右侧,由于 $\omega_k < \omega_{k-1}$,说明PWM的占空比在增加,所以应继续增加PWM占空比,降低转速,直到风机运行在最大功率点上。

4) $P_k < P_{k-1}$ 且 $\omega_k < \omega_{k-1}$,这表明此刻风机运行在最大功率点的左侧,由于 $\omega_k < \omega_{k-1}$,说明PWM的占空比在增加,所以应向相反方向减小PWM占空比,增加转速,直到风机运行在最大功率点上。

上述分析流程图如图5所示。其中, U_k 、 I_k 分别为 k 时刻变换器的输出电压和电流; D_{k+1} 、 D_k 分别为 $k+1$ 时刻和 k 时刻的占空比; ΔD 为占空比固定步长。

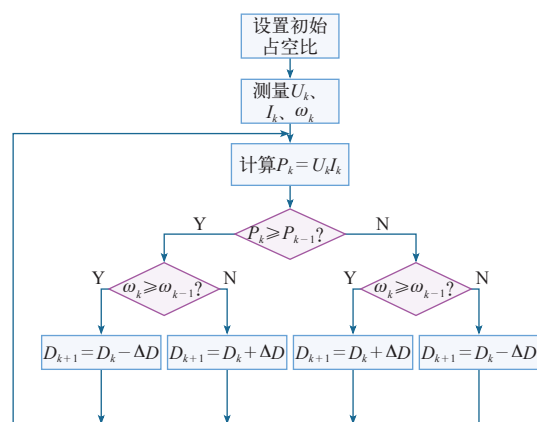


图5 固定步长控制算法流程图

2.3 梯度式变步长扰动占空比原理

由于固定步长占空比法在稳定运行时在最大功率处有较大波动,本文提出梯度式变步长扰动占空比法。梯度法是一种传统且广泛用于求取函数极值的方法。最优梯度法的迭代算法可以写成

$$D_{k+1} = D_k + a_k g_k \quad (8)$$

式中, $g_k = g(\omega_k) = dp/d\omega|_{\omega=\omega_k}$; a_k 为非负数常数。

可见,基于最优梯度法的MPPT控制实际上是按风力发电 $P-\omega$ 特性曲线的斜率而自动改变变换器的占空比扰动步长。当工作点位于最大功率点左侧斜率较大的区域时,占空比以一较大步长的扰动量减小,并随着向最大功率点的靠近,斜率降低,扰动步长也随之减小;当工作点位于最大功率点右侧斜率较大的区域时,占空比以一较大的步长增加扰动量,但随着向最大功率点的靠近,斜率减小,扰动的步长亦自动变小。在最大功率点处,斜率为零,扰动步长为零,系统可以稳定运行。以上分析表明,最优梯度法能快速实现最大功率点跟踪,同时几乎稳定在最大功率点处。

3 系统仿真结果对比

为了验证上述改进方法的有效性和优越性,在Matlab/Simulink搭建了基于Boost电路的最大功率控制系统仿真模型,由风轮系统、PMSG系统、整流系统、Boost电路系统和MPPT控制系统组成。采用的发电机参数为:定子电阻 $r = 0.875 \Omega$;

电感 $L_d=0.0065\text{ H}$, $L_q=0.0065\text{ H}$; 转子磁通量 $\Phi=0.175\text{ Wb}$; 转动惯量 $J=0.008\text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 极对数 $p=8$ 。图6~8为仿真结果图。

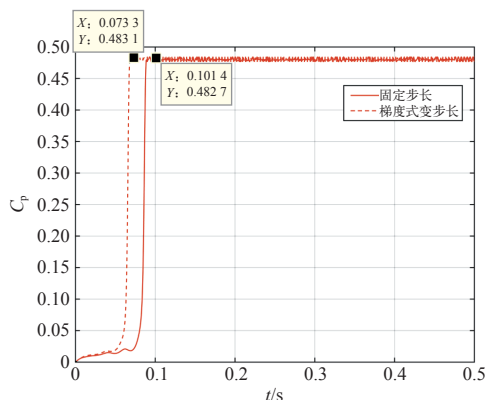


图6 风能利用系数对比图

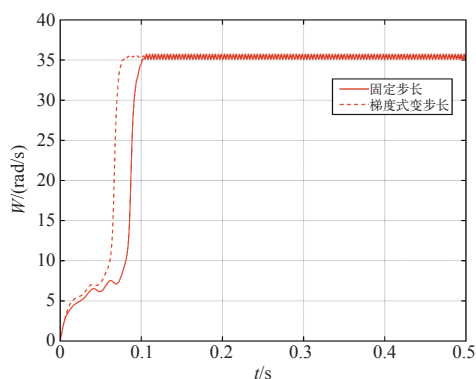


图7 发电机转速对比图

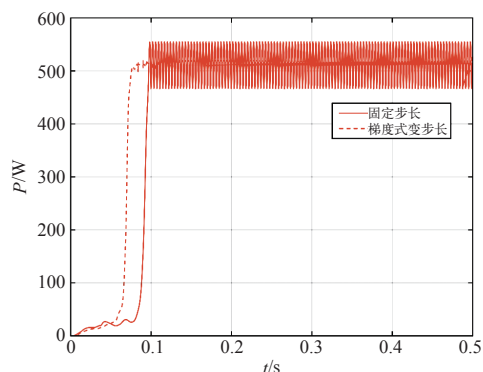


图8 输出功率对比图

由图6~图8可知,虽然两种方法都可以追踪到最大功率运行点。固定步长算法用时0.1 s风能利用系数达到最大值,转速开始稳定在33~37 rad/s波动,追踪到最大功率点;而梯度式变步长算法仅用时0.07 s就追踪到最大功率点,并且发电机稳定

运行在35 rad/s。对比可知,改进算法不但能较快的追踪到最大功率运行点,而且稳定运行时波动较小,说明改进算法有效且优于固定步长。

4 结束语

对基于Boost电路的小型直驱式永磁同步风力发电系统进行了建模,详细分析了其电路结构。根据风力发电系统输出功率的变化对占空比进行调节,进行最大功率跟踪。仿真结果表明,梯度式变步长最大功率跟踪算法不但能快速有效地跟踪最大功率,同时可稳定运行,波动较小。

参考文献

- [1] 齐保良,文鹏,李成栋.模糊控制在离网风力发电最大风能捕获中的应用[J].计算机系统应用,2014(1):166-170.
- [2] 栗然,高起山,刘伟.直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J].电网技术,2011,35(10):153-158.
- [3] 刘爱国,薛云涛,胡江鹭,等.基于GA优化SVM的风电功率的超短期预测[J].电力系统保护与控制,2015,43(2):90-95.
- [4] 孟克其劳,陈虎,钱春震,等.永磁直驱风力发电系统最大功率追踪策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(22):83-87.
- [5] 李咸善,徐浩,杜于龙.采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的风力发电系统最大功率点跟踪研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(13):66-71.
- [6] 刘丹,李强,冯承超.小型直驱式永磁同步风力发电机快速最大功率追踪仿真研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(5):141-145.
- [7] 李娟,张克兆,李生权,等.最佳叶尖速比的最大功率自抗扰跟踪控制[J].电机与控制学报,2015,19(12):94-100.
- [8] 曾凡超,张兴,朱波,等.基于Boost变换器的变速风力机MPPT系统的研究[J].微电机,2010,43(10):36-39.

(收稿日期:2016-10-07) EA