

基于模糊控制的永磁直驱风力发电机最大功率跟踪控制

裴俊, 刘世林, 樊国东

(高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室(安徽工程大学), 安徽 芜湖 241000)

摘要:针对永磁直驱风力发电机的输出功率难以稳定且快速地达到最大功率点的问题,提出了一种基于模糊控制的直驱式永磁同步风力发电机最大功率跟踪控制(maximum power point tracking, MPPT)策略。分析直驱式永磁同步发电机的工作特性和数学模型,进而阐述利用升压电路实现 MPPT 的原理与基础知识。以风电系统 MPPT 原理及模糊控制理论为基础,升压电路的本周期和上个周期占空比的差值、输出功率的差值作为模糊控制的输入,下个周期的升压电路占空比为输出。并根据所需预期控制效果推理模糊控制规则设计出一种适于永磁直驱风力发电机的模糊控制器,搭建包含 MPPT 的永磁直驱风力发电系统的 Matlab/Simulink 整体模型并仿真,结果证明该控制策略的可行性及优越性。

关键词:风力发电;最大功率追踪;永磁同步发电机;模糊控制

中图分类号:TM315

文献标志码:A

引言

新能源发电技术已逐渐成为各国研究的焦点。风能作为一种绿色且可再生的能源受到广泛重视,且正逐步成为全世界新能源利用的主要形式之一^[1-2]。直驱式永磁同步发电机(direct drive permanent magnet synchronous generator, D-PMSG)的风机和电机直接相连省去了中间齿轮箱,相较于双馈风力发电机,可以节约一定的运行和维修成本。而 D-PMSG 风电系统大多采用加入 AC/DC 整流器的简单结构,仅具备一般的放电和启停控制功能,较少涉及最大功率追踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,从而会导致风能转化率较低。因

此,开展关于 D-PMSG 的 MPPT 控制技术研究具有重要意义^[3-5]。

目前,在风力发电系统中 MPPT 主要有两大类方法。一类是最佳风力机特性曲线法,如最佳叶尖速比法、最优转矩曲线法及最佳功率曲线法^[6]。最优曲线法的必要条件是需获得风机的具体参数,因此还需要增加测风环节,但是在实际中风速的检测会存在误差,导致此类控制方法实用性不高^[7]。文献[8-10]建立了风速估计模型,在此基础上提出一种相适应的 MPPT 复合控制方法,一定程度上解决了风速测量存在误差的问题。文献[11]设计了在额定风速上下两种情况的电机控制系统,在风速较低和较高时分别采用双闭环和模糊 PI 控

收稿日期:2019-11-23

基金项目:安徽省教育厅自然科学重点项目(KJ2018A0121);安徽高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2017103)

作者简介:裴俊(1996-),男,安徽马鞍山人,硕士生,主要从事永磁直驱风电机的功率优化方面的研究,(E-mail) pj2533309974@qq.com

通信作者:刘世林(1978-),男,安徽六安人,教授,博士,主要从事储能技术应用、智能电网运行与控制等方面的研究,(E-mail) sl.liu@ahpu.edu.cn

制系统,使风电机组可以在最大功率点(maximum power point, MPP)稳定运行。另一类是寻优法,即爬山搜索算法,典型代表是固定步长爬山搜索算法和变步长爬山搜索算法^[12]。由于爬山法不需要知道风机详细的参数和实时风速,所以不需要多余的测风装置,降低了机组成本,但缺点是不能迅速跟踪到 MPP 处,并且会在接近 MPP 时波动较大^[13]。文献[14]在 PMSG 矢量调控技术的基础上,优化了传统的变步长 MPPT 控制策略,解决了在风速发生突变时跟踪速度和系统稳态之间相矛盾的问题。文献[15]提出了一种新型梯度式变步长爬山搜索算法,一定程度降低了系统在 MPPT 时波动。文献[16]在传统爬山法的基础上引入了一种停止机制,该控制策略基本解决了风速突发扰动对搜索方向造成干扰的问题,稳定了系统在 MPP 的运行。上述一系列文献所提控制策略虽然减小了风速突变对永磁直驱风力发电机 MPPT 的影响,但是大多数都忽视了机组运行状态接近 MPP 时仍存在较大波动的情况。

本文基于传统 MPPT 原理和模糊控制理论,提出了一种基于模糊控制的 D-PMSG 的 MPPT 控制策略,并在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建了完整的 D-PMSG 的模型,与传统固定步长和变步长爬山法仿真结果进行对比,证明了该控制策略的有效性和优越性。

1 系统结构原理和建模

1.1 系统结构

本文使用的 D-PMSG 的结构如图 1 所示,风力机与电机转子直接耦合,机侧采用三相不可控二极管整流桥式电路加上 BOOST 升压电路,网侧采用了 PWM 逆变电路。首先三相不可控二极管整流桥将发电机定子的输出电流进行整流,然后利用 DC/AC 将电压稳定控制,最后利用网侧的逆变器逆变后馈入电网。

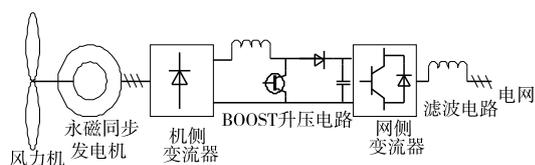


图 1 D-PMSG 风电系统结构图

1.2 风力机特性

风力机是 D-PMSG 中不可或缺的装置,其基本的工

作原理是:利用风轮叶片将风能捕获,并随即将其转化为机械能,然后以转矩的形式输入到发电机中^[17]。风力机的输出功率 P_w 可表示为:

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

其中:

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

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度 (kg/m^3); v 为风速 (m/s); R 为风轮半径 (m); C_p 为风能利用系数; λ 为叶尖速比; λ_i 为中间变量; ω 为风力机的电角速度 (rad/s); β 为桨距角。

2 基于 BOOST 电路实现最大功率追踪原理

根据上述风机的原理和工作特性可知,当桨距角为一定值时,在某一风速下, D-PMSG 的风能利用系数和输出功率都只与电机转速有关。根据公式中的单调趋向关系可知,此时肯定会存在某一电机转速使得风力机输出功率和风能利用系数达到最大。由于 D-PMSG 的风力机与电机的转子直接用机械轴连接,即两者的转速相等,所以某一风速下,只需要控制 D-PMSG 的转速,就可以让系统在 MPP 处运行。当风速发生突变扰动时,通过控制系统来保持电机转速的同步来实现系统的 MPPT。电机转速关系与系统输出功率如图 2 所示。

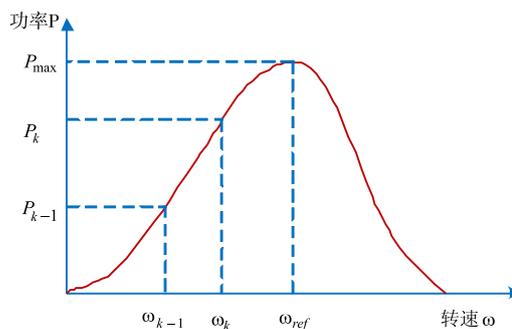


图 2 某一风速下电机转速关系与系统输出功率曲线

包含 BOOST 升压电路的离网型 D-PMSG 系统等效电路图如图 3 所示。

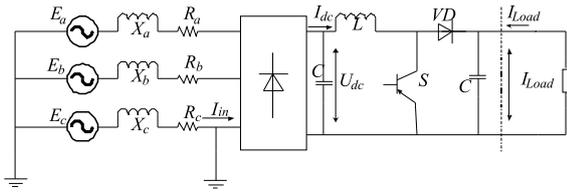


图 3 离网型 D-PMSG 系统等效电路图

根据 BOOST 升压电路的基本结构和原理知识可知,其输入和输出电压之间的关系可以表示为:

$$U_{Load} = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} U_{dc} = \frac{T}{T - t_{on}} U_{dc} = \frac{1}{1 - D} U_{dc} \quad (5)$$

根据 DC-DC 变换前后的功率守恒定律可以得到,输出电流 I_{dc} 和负载电流 I_{Load} 之间存在关系如下:

$$I_{Load} = (1 - D) I_{dc} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知:

$$R_{Load} = \frac{1}{(1 - D)^2} R_{dc} \quad (7)$$

假设发电机定子的输出线电压为 V_L , 则 U_{dc} 可以表示为:

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} V_L \cos\theta d\theta = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_L = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{in} \quad (8)$$

如果不计整个风电系统中变换器件的功率损耗,则整流环节前后的功率相等,可以表示为:

$$U_{in} I_{in} = \frac{1}{3} U_{dc} I_{dc} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)两式可以得到:

$$I_{dc} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_{in} \quad (10)$$

由式(8)和式(10)两式可以得到:

$$R_{in} = \frac{\pi^2}{18} R_{dc} \quad (11)$$

将式(11)带入式(7)可以得到:

$$R_{in} = \frac{\pi^2}{18} (1 - D^2) R_{dc} \quad (12)$$

根据式(7)和式(12)两式可以得出以下结论:利用改变占空比 D 的值来改变基于 D-PMSG 的风电机组等效负载值,即改变了机组的负载输出特性,根据 MPPT 调节方式中直接功率控制原理可知,当负载输出特性和 D-PMSG 的输出特性相匹配时,发电机组就可以在 MPP

处稳定运行。根据贝茨极限定理和上述推理可知,在某一定风速下,二者都存在一个占空比 D 使风电机组运行在 MPP 上。

3 模糊控制器的设计

如前所述,风电系统中风速的变化会影响输出功率,且风速的变化会受到很多不明确的因素影响。因此,在本文中提出了一种基于模糊控制的 D-PMSG 系统 MPPT 控制策略,其中利用模糊控制实现 D-PMSG 的 MPPT 的结构框图如图 4 所示。

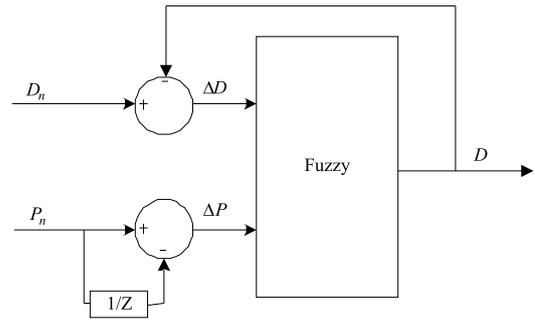


图 4 风电系统 MPPT 中模糊控制结构图

3.1 输入输出量的模糊集合及论域

基于前面的分析可知,通过改变 BOOST 升压电路的占空比 D 的值可以控制风电系统的输出功率,因此可以选择 BOOST 电路的本周期和上个周期占空比的差值、本周期输出功率的差值作为模糊控制的输入信号量,并将其模糊化处理,然后经过模糊规则库进行逻辑推理后可以得出下个周期的所需改变占空比的大小和方向。将输入量进行量化并映射到模糊集合域 E_p 、 E_D 、 E_{D1} 。它们分别对应的等级集合为:

$$E_p = \{NB, NM, NS, ZE, NS, NM, NB\}$$

$$E_D = E_{D1} = \{NB, NM, NS, NS, NM, NB\}$$

其中:NB 为负大,NS 为负小,ZE 为零,PS 为正小,PB 为正大。

3.2 隶属度函数

根据前文提到的系统输出功率和占空比之间的关系大致是一个类似抛物线的曲线,所以在本文中可以选择三角形状的隶属函数 trimf,所得具体隶属度函数如图 5 ~ 图 7 所示。

3.3 模糊规则

根据本文中对 D-PMSG 的 MPPT 控制效果要求,当

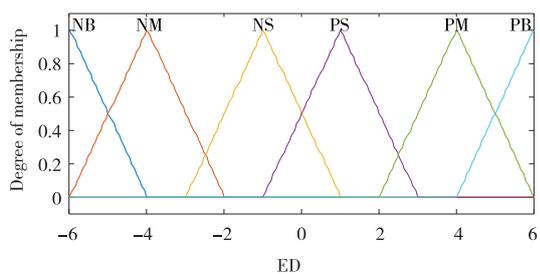


图5 BOOST电路占空比变化量

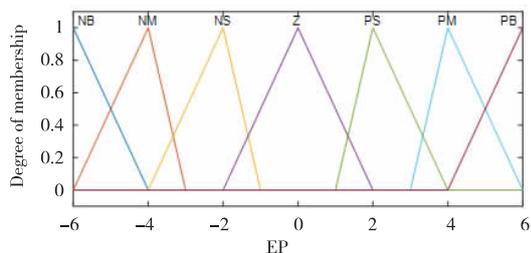


图6 风电系统功率变化量

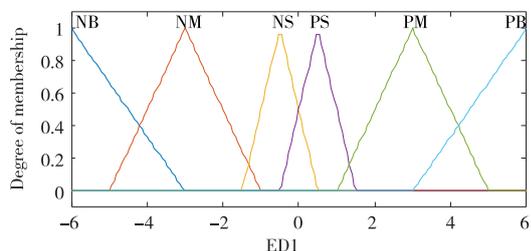


图7 模糊控制系统输出占空比

系统输出功率减小了,则应该调整原来的扰动方向,如果系统输出功率增加了,则应该按照原来的步长来稍许继续增加。当距离系统 MPP 较远时,应该使用较大的步长进行跟踪,当距离 MPP 较近时,则应该使用较小的步长进行跟踪。通过以上约束可以分析得出控制规则,见表 1。

表 1 模糊规则

$\Delta P/\Delta D$	NB	NM	NS	PS	PM	PB
NB	PM	PB	PB	NS	NM	NB
NM	PM	PB	PB	NS	NM	NM
NS	PS	PM	PM	NS	NS	NS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	NS	NS	NS	PS	PS	PS
PM	NM	NM	NS	PB	PB	PM
PB	NB	NM	NS	PB	PB	PB

3.4 去模糊化

为获取更准确的控制量,输出隶属度函数的计算结果需要能够很好地表达,则需要经过去模糊化处理。本

文选取的方法为重心法,其公式为:

$$u = \frac{\int_u A(u) u du}{\int_u A(u) du}$$

式中: $A(u)$ 为论域 U 上 F 集合 A 的隶属度函数。

4 仿真结果及分析验证

本文的仿真参数如下:空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, 风轮半径 $R = 4 \text{ m}$, 风电机的桨距角 $\beta = 0^\circ$, PMSG 参数为:定子相电阻 $R_s = 0.05 \Omega$, 定子绕组电感 $L = 3.95 \times 10^{-4} \text{ H}$, 转动惯量 $J = 0.192 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 极对数 36, 本文中风电机组不计摩擦系数, 输入的阶跃风速为 $12 \text{ m/s} \sim 15 \text{ m/s}$, BOOST 电路负载 $R = 15 \Omega$, 设定仿真时间为 2 s 。利用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建 D-PMSG 系统 MPPT 的整体模型。仿真所得结果如图 8 ~ 图 11 所示。

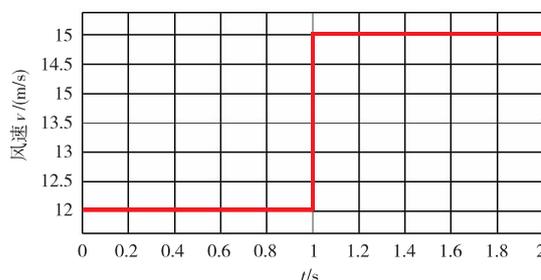


图8 阶跃风速变化示意图

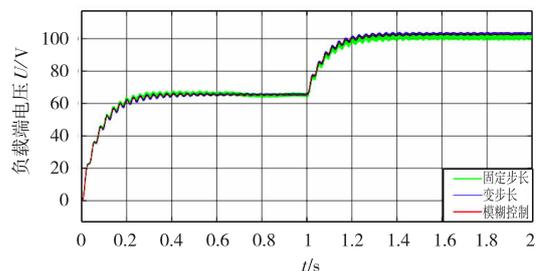


图9 负载端电压对比图

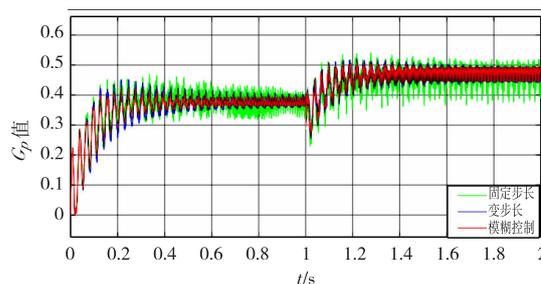


图10 C_p 值对比图

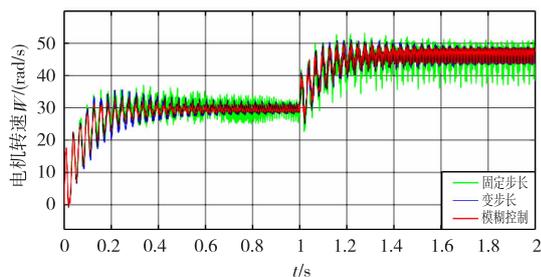


图 11 电机转速对比图

通过上述仿真分析可以明显看出,这三种方法都可以实现 PMSG 风电系统的 MPPT,但是固定步长算法由于步长的一成不变,所以在整个 2 s 内的追踪过程和 1 s 时风速由 12 m/s 突变成 15 m/s 时波动都非常明显。变步长爬山算法因为会根据追踪的情况来改变步长,所以在 0.4 s、1.4 s 和 1 s 风速变化时都一定程度上减小了波动,但是在追踪到 MPP 之前负载端电压和电机转速还是存在波动。基于模糊控制的 MPPT 因为通过使用模糊推理得到的自适应步长,与设定的变化步长相比,很明显自适应步长更具有优势,所以不但能和爬山法几乎同时追踪到 MPP,且其电机转速和负载端电压的波动在 0.4 s、1 s、1.4 s 相比于变步长爬山法都明显变小。综上所述,所得仿真结果证明了本文提出的基于模糊控制的 MPPT 的有效性,且相较于固定步长和变步长算法更有优越性。

5 结束语

本文经过对 D-PMSG 的原理和结构的分析,阐述了基于 BOOST 电路达到 MPPT 的原理,提出了一种基于模糊控制的 D-PMSG 的 MPPT 控制策略,结合 MPPT 与模糊控制原理设计了 D-PMSG 的 MPPT 模糊控制器。搭建了 Matlab/Simulink 仿真模型,对比分析仿真结果验证了所提控制策略的有效性和优越性。

参考文献:

[1] 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跟踪控制[J].中国电机工程学报,2009,29(27):106-111.

[2] KSHIRSAGAR P, BURGOS R P, LIDOZZI A, et al. Implementation and sensorless vector-control design and tuning strategy for SMPM machines in fan-type appli-

cations [C]//Proceedings of Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, USA, October 8-12, 2006. doi:10.1109/IAS.2006.256819.

- [3] 廖勇,庄凯,姚骏,等.直驱式永磁同步风力发电机双模功率控制策略的仿真研究[J].中国电机工程学报,2009,29(33):76-82.
- [4] 刘世林,文劲宇,孙海顺,等.风电并网中的储能技术研究进展[J].电力系统保护与控制,2013,41(23):145-153.
- [5] TANG C, SOONG W L, FREERE P, et al. Dynamic wind turbine output power reduction under varying wind speed conditions due to inertia[J]. Wind Energy, 2013,16(4):561-573.
- [6] 夏长亮.永磁风力发电系统及其功率变换技术[J].电工技术学报,2012,27(11):1-13.
- [7] 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.
- [8] 刘卫亮,刘长良,林永君,等.基于风速估计的小型永磁直驱风力发电系统 MPPT 控制方法[J].太阳能学报,2017,38(3):631-639.
- [9] 焦绪国,杨秦敏,孙勇,等.基于有效风速估计与预测的风电机组自适应最大风能跟踪控制(英文)[J].控制理论与应用,2019,36(3):372-382.
- [10] 李大中,郭峰.一种风电机组非奇异快速终端滑模 MPPT 控制方法[J].系统仿真学报,2018,30(3):1109-1117.
- [11] 孟克其劳,陈虎,钱春震,等.永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(22):83-87,93.
- [12] 宋胜男.小型直驱永磁风力发电系统建模及 MPPT 控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2015.
- [13] 张小莲.基于爬山法的风力机最大功率点跟踪控制研究[J].科技创新与应用,2017(27):12-13,15.
- [14] 田兵,赵克,孙东阳,等.改进型变步长最大功率跟踪算法在风力发电系统中的应用[J].电工技术学报,2016,31(6):226-233,250.

- [15] 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.
- [16] 张小莲,李群,殷明慧,等.一种引入停止机制的改进爬山算法[J].中国电机工程学报,2012,32(14):128-134.
- [17] 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.

Maximum Power Point Tracking Control of Direct Drive Permanent Magnet Wind Generator Based on Fuzzy Control

PEI Jun, LIU Shilin, FAN Guodong

(Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-end Equipment, Ministry of Education(Anhui Polytechnic University), Wuhu 241000, China)

Abstract: Aiming at the difficulty that the output power of direct drive permanent magnet wind generator have problems to reach the maximum power point stably and quickly, a maximum power point tracking (MPPT) strategy for direct drive permanent magnet wind generator based on fuzzy control is proposed. Through analyzing the working characteristics and mathematical model of direct-drive permanent magnet synchronous generator, the principle and basic knowledge of MPPT using boost circuit are described. Based on the MPPT principle and fuzzy control theory of the wind power system, the difference between the duty cycle of the current cycle and the previous cycle of the booster circuit and the difference of the output power are selected as the input of the fuzzy control, and the boost circuit of the next cycle is output. Then the fuzzy controller suitable for direct drive permanent magnet wind generator is designed based on the inference of fuzzy control rules of the expected control effect, and the Matlab/Simulink overall model of the direct drive permanent magnet wind generator including MPPT segment based on the above control strategy is built and simulated, and the research results show the feasibility and superiority of the control strategy.

Key words: wind power; maximum power point tracking; permanent magnet synchronous generator; fuzzy control