DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.06.058

基于 BP 神经网络的 SRG 风力发电最大功率点跟踪研究

卢智鹏,王宏华

(河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘　要:以 8/6 四相开关磁阻发电机(SRG)为例,针对风速的突变性和不确定性,传统 PI 控制器难以有效准确地实现最大功率点跟踪(MPPT),采用一种基于 BP 神经网络算法优化 PI 控制器控制参数,进而调整励磁电流,使 SRG 风力发电系统准确运行于最大功率点。在 Matlab/Simulink 中搭建开关磁阻风力发电机模型并进行仿真分析。仿真表明:与传统 MPPT 策略相比,当风速连续变化时,改进的 MPPT 控制策略可以良好地实现 SRG 风力发电 MPPT。

关键词:开关磁阻发电机;风力发电;最大功率点跟踪;BP 神经网络

中图分类号:TM315　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1671-5276(2019)06-0217-04

Research on MPPT Strategy of SRG Wind Power Generation Based on BP Algorithm

LU Zhipeng, WANG Honghua

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper takes 8/6 four-phase switched reluctance generator (SRG) as an example, Due to the sudden change and uncertainty of wind speed, it is difficult to use the traditional PI controller to effectively and accurately achieve maximum power point tracking (MPPT). BP neural network algorithm is used to optimize the control parameters of PI controller, for adjusting the excitation current, thus making the SRG wind power generation system operate accurately at the maximum power point. The switched reluctance wind turbine model is built and simulated in Matlab/Simulink. The simulation results show that compared with the traditional MPPT strategy, the improved MPPT control strategy can be used to achieve the maximum power point tracking of SRG wind power generation well when the wind speed changes continuously.

Keywords: switched reluctance generator; wind power generation; maximum power point tracking; BP neural network

0　引言

风力发电作为可再生能源开发利用中成本较低、可靠性较高、技术较成熟、发展速度较快的发电方式之一已受到广泛关注。目前风力发电主要有两种形式:双馈风力发电(双馈感应发电机)和直驱风力发电(永磁同步发电机)。随着新材料和新技术的发展,一些新型特种电机(如开关磁阻电机)因其独有的优势而具备良好的商业化发展前景。开关磁阻发电机(SRG)结构坚固、简单,成本低,效率高,允许温升较高,适用于环境恶劣场合,功率变换器是单极性的,相绕组与主开关串联,安全裕度较大,是变速恒频风力发电系统中具有发展前景的一种新型同步发电机[1-2]。

风力发电技术的核心问题之一是最大功率点跟踪(MPPT)。目前常用的 MPPT 算法有:最佳叶尖速比法(TSR)、功率信号反馈法(PSF)和爬山搜索法(HCS)。文献[3]提出了 SRG 功率扰动 MPPT 方案,通过检测 SRG 的输出功率和速度,实现了在励磁电流扰动下的 MPPT。文献[4]提出了一种直接转速扰动最大功率跟踪方法,采用变步长的爬升搜索算法来调整开关磁阻风力发电机的最大输出功率。由于 SRG 存在非线性,导致 SRG 功率扰动方案和直接转速扰动控制方案在转速快速下降的情况下会不稳定。因此,本文采用 TSR 设计一种基于 BP 神经网络的 SRG 风力发电 MPPT 控制算法,利用神经网络的学习能力优化 PI 控制参数,并在风速阶跃变化时利用 Matlab/Simulink 对 PI 控制和 BP 优化控制的模型进行仿真对比,验证改进的 MPPT 控制策略能使系统更好地稳定运行在最大功率点。

1　SRG 风力发电机特性分析

1.1　风力机 MPPT 原理

由贝茨定理可知,风力机输出的机械功率 P_m 为:

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

式中:ρ 为空气密度,$\rho=1.25\ \mathrm{kg/m^3}$;$v$ 为风力机的上游风速,m/s;S 为风力机风轮的扫风面积,$\mathrm{m^2}$,$S=\pi R^2$;C_p 为风能利用系数,是桨距角 β 和叶尖速比 λ 的非线性函数,根据贝茨(betz)极限,该系数理论最大值为 0.593[5],而叶尖速比 $\lambda=\omega R/v$,其中 ω 为风力机风轮角速度,rad/s,R 为风

作者简介:卢智鹏(1996—),男,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为智能技术在测试中的应用。

轮半径,m。

文献[6] 给出了当桨距角 β 为 0°时风力机风能利用系数 C_p 的表达式,其曲线如图 1 所示。

$$\begin{cases} C_p(\lambda)=0.22[116/\lambda_i-5]e^{-12.5/\lambda_i} \\ \dfrac{1}{\lambda_i}=\dfrac{1}{\lambda}-0.035 \end{cases} \tag{2}$$

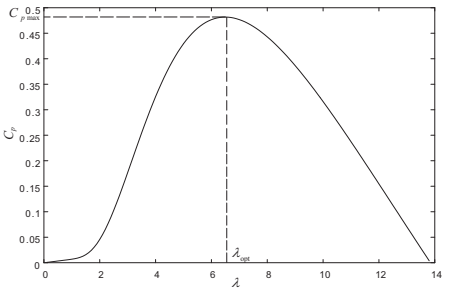


图 1　风力机 $C_p-\lambda$ 曲线

图 1 中最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}=6.5$,该处对应最大风能利用系数 $C_{p\max}=0.482$,即风力机运行于最大功率点 $P_{\max}$ 上。风力发电系统的 MPPT 是在风速发生变化时,通过优化算法调节发电机角速度,进而控制风力机风轮角速度使叶尖速比为最佳叶尖速比,使风能利用系数保持在最大值,风力机输出功率维持在最大值。

综合上述两式,建立风力机 Simulink 仿真模型如图 2 所示。

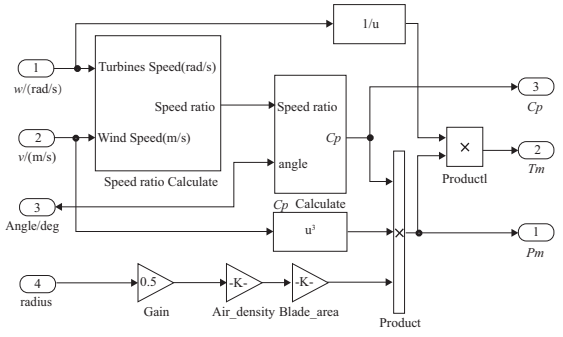


图 2　风力机仿真模型

1.2　开关磁阻发电机工作原理

SRG 是双凸极变磁阻电机,其定、转子凸极均由高磁导率的硅钢片叠成,定子上绕有集中绕组,转子上既无绕组也无永磁体。本文以 8/6 四相 SRG 为例,图 3 为其结构图,其中只画出了 A 相绕组及其主开关电路。

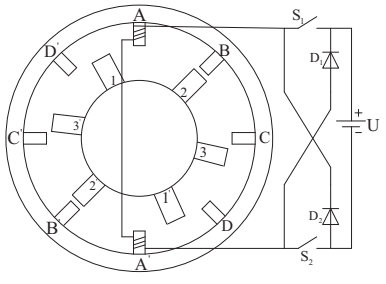


图 3　四相 8/6 极 SRG 结构图

SRG 遵循“磁阻最小原理”——磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合,即磁力的方向总是指向磁阻最小的位置。设图 3 中转子在风力机驱动下按逆时针旋转运动,当定子 B-B' 与转子 2-2' 重合时,闭合主开关管 S_1、S_2,励磁电源 U 给 A 相绕组通电励磁,磁通通过定子 A、气隙、转子 1、铁心、转子 1'、气隙、最终通过定子 A' 形成闭合回路。由于定子 A-A' 与转子 1-1' 不重合,根据“磁阻最小原理”,转子 1-1' 将受到顺时针旋转的力矩以达到磁阻最小,与风力机的力矩方向正好相反。此时,SRG 处于励磁阶段,转子上的机械能将转化为磁能存储在 A 相绕组磁场中。当 S_1、S_2 关断时,电流通过续流二极管 D_1、D_2 回馈给电源 U。此时,SRG 处于发电阶段,A 相绕组中电流方向不变,回馈给电源,而磁场中存储的磁能转化为电能并释放出来进行发电,从而实现以磁能为媒介的机电能量转换。当沿着A-B-C-D-A的顺序对开关磁阻电机进行励磁,即可持续维持其发电状态。根据以上分析,SRG 磁链和相电流波形如图 4 所示[7]。

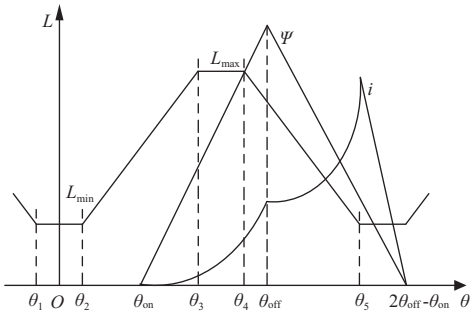


图 4　SRG 磁链和相电流波形

图 4 中,θ_{on}—θ_{off} 阶段为励磁状态,θ_{off}—$2\theta_{off}$—θ_{on} 阶段为续流发电阶段。励磁阶段可通过调节开通角 θ_{on}、关断角 θ_{off} 时来控制,而续流发电阶段一般不可控,只能通过间接控制励磁阶段来调节。

SRG 有自励和他励 2 种励磁模式。考虑成本和可靠性,在风力发电系统的研究中多采用自励模式运行[8],自励模式电路图如图 5 所示。

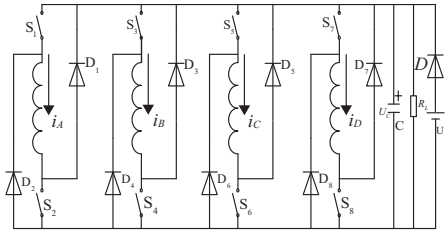


图 5　自励模式

SRG 有电流斩波控制(CCC)、角度位置控制(APC)和脉宽调制控制(PWM)3 种控制方式,其控制参数主要包括开通角、关断角、相电流和相电压等。CCC 控制方法简单,可控性较好,本文采用该方式。

2　SRG 风力发电机 MPPT 仿真研究

本文采用 TSR 实现 MPPT 控制,根据上述分析可知,

在风力机桨距角 $\beta=0°$时,确定最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}=6.5$,而叶尖速比 $\lambda=\omega R/v$,可得到在最佳叶尖速比下的 SRG 角速度:

$$\omega^{*}=N\frac{\lambda_{opt}v}{R} \tag{3}$$

式中 N 为升速齿轮箱传动比。

2.1　BP 神经网络控制器

在 PI 控制器实现 MPPT 时,由风力机给出条件和风速等参数,结合式(3)计算出最佳叶尖速比下的 SRG 角速度 ω^{*},并与 SRG 输出角速度 ω_t 比较得到误差值,经 PI 控制器得出 SRG 相电流斩波阈值 i_{chop}。i_{chop}结合 θ_{on}、θ_{off}以及角速度等参数通过电流斩波控制得到 SRG 输出转矩 T_{em},在 T_{em}和风力机输出转矩 T_m共同作用下引起 ω_t 变化,并与当前给定角速度进行比较,通过 PI 控制器调节得到新的 i_{chop1},经反馈控制使风能利用系数保持在最大值,实现 MPPT 控制。

由于 SRG 存在非线性,PI 控制器必须在比例、积分控制组合中找到最佳参数才能得到较好的控制效果。本文利用神经网络的学习能力优化传统 PI 控制参数,找到最佳组合的控制参数,在 TSR 下实现 MPPT 控制。本文采用 3 层 BP 网络结构[9],如图 6 所示。

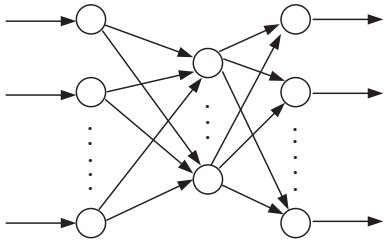


图 6　BP 网络结构

图 6 中包括输入层、隐含层和输出层。网络各层的输入、输出关系为:

$$\begin{cases} O_i = x(j) \\ net_j^{(2)}(k) = \sum_{i=1}^{N} w_{ij}^{(2)} O_i \\ O_j^{(2)}(k) = f_1(net_j^{(2)}(k)) \\ net_l^{(3)}(k) = \sum_{j=1}^{M} w_{jl}^{(3)} O_j^{(2)}(k) \\ O_l^{(3)}(k) = f_2(net_l^{(3)}(k)) \end{cases} \tag{4}$$

本文选取的活化函数均为 Sigmoid 函数。利用 BP 神经网络算法在线编写 S 函数优化 PI 控制器控制参数,图 7 为基于 BP 算法的发电机速度反馈控制系统图。

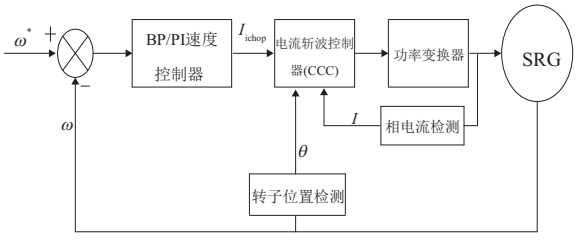


图 7　SRG 速度反馈控制系统图

2.2　系统仿真分析

根据前文所述 MPPT 算法,在 Matlab/Simulink 中搭建 SRG 风力发电仿真模型,如图 8 所示。

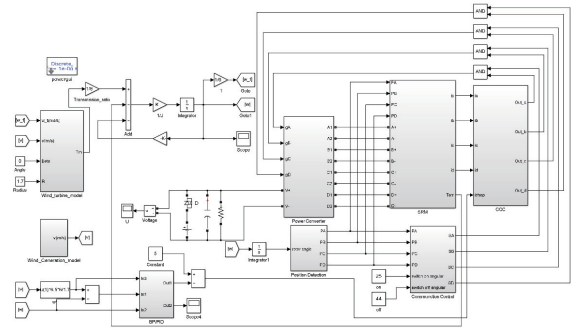
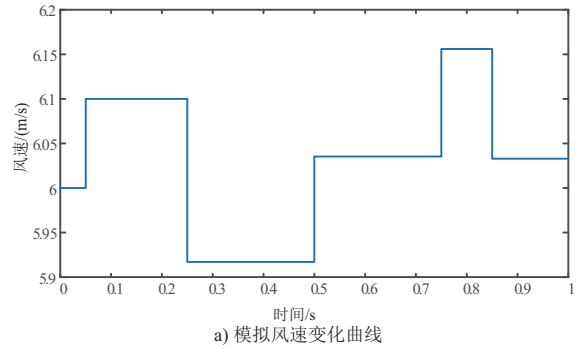


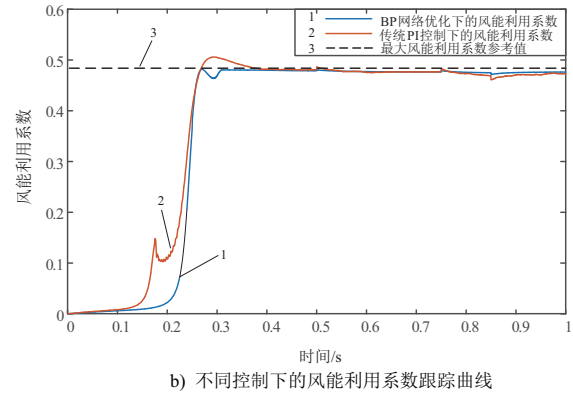
图 8　开关磁阻风力发电系统模型

图 8 中 Wind_Generation_model 用于模拟风速变化,设置风速变化在 5.9 m/s ~ 6.2 m/s 之间;Wind_turbine_model 为风力机仿真模块。本系统中相关参数如下:桨距角 $\beta=0°$,风轮半径 $R=1.7$ m,最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}=6.5$,最大风能利用系数 $C_{p\max}=0.482$,升速齿轮箱传动比 $N=6$;SRG 额定功率 750 W,转动惯量 0.001 7 kg·m^2,摩擦系数 0.008 13 N·m·s。设置励磁电压 $U=50$ V,输出端并联电容 $C=1\,000$ μF,负载 $R_L=100\,\Omega$,$\theta_{on}=25°$,$\theta_{off}=44°$,采样时间 $T_s=1\times10^{-6}$ s。仿真波形如图 9 所示。

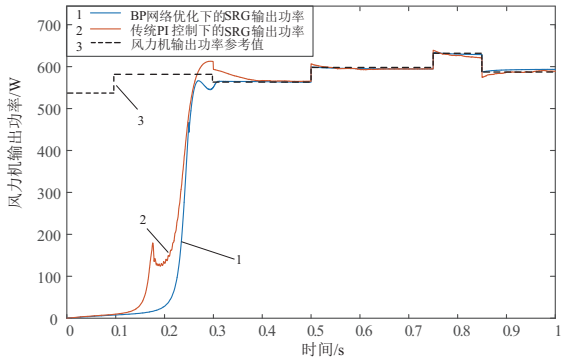
C_p和 P_m随风速变化而变化,风速变化至 0.3 s 时,C_p和 P_m趋于稳定。由上文分析可知本文研究对象的最大风能利用系数 $C_{p\max}=0.482$,在图 9b)中的 C_p跟踪曲线可以看出,当风速发生突变时,同作为该系统的 MPPT 调节器,PI 控制器对比于经 BP 神经网络算法优化的控制器在稳



a) 模拟风速变化曲线



b) 不同控制下的风能利用系数跟踪曲线



c) 不同控制下的风力机输出功率跟踪曲线

图 9　MPPT 仿真对比

定阶段发生较大超调现象,未能有效准确地实现最大风能利用系数跟踪。同理在图 9c)中经 BP 神经网络算法优化的控制器随着风速变化时较快实现输出功率跟踪,在稳定后随着风速变化输出功率跟踪速度较之前也有明显提升。

从图 9 和以上分析可知,当风速变化时,利用经 BP 神经网络算法优化的控制器进行 MPPT 调节,参数 C_p 和 P_m 可以较快实现跟踪控制,说明本文设计的优化控制器能够更有效地实现 SRG 风力发电 MPPT,同时也验证了该方法的有效性。

3　结语

本文以 8/6 四相 SRG 为例,针对风速的突变性和不确定性,在风速连续阶跃变化时基于 Matlab/Simulink 对传统 PI 的 MPPT 控制策略和基于 BP 神经网络优化的改进 MPPT 控制策略的系统模型进行仿真,通过对比两种方案的风能利用系数 C_p 和风力机输出功率 P_m 仿真结果可知,基于 BP 神经网络优化的改进 MPPT 控制策略在保证稳定精度的前提下,可以更加快速地实现 MPPT。

参考文献:

[1] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[2] 王宏华. 风力发电技术系列讲座:风力发电机及其功率变换器的发展现状[J]. 机械制造与自动化,2010,39(2):190-192.

[3] 熊立新,徐丙垠,高厚磊,等. 一种开关磁阻风力发电机最大风能跟踪方法[J]. 电工技术学报,2009,24(11):1-7.

[4] X. Zhi, D. Xiangjun, L. Lei. MPPT for wind power system with switched reluctance generator [C]. 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan: 2018: 1420-1424.

[5] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, et al. Wind Energy Handbook [M]. ChiChester: John Wiley & Sons,2001.

[6] 赵雪浩. 九相定子永磁风力发电机控制技术研究[D]. 南京:东南大学,2017.

[7] 龚湖广. 开关磁阻风力发电系统输出功率优化控制研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2017.

[8] 林显军,程小华. 开关磁阻风力发电技术[J]. 电机与控制应用,2011,38(9):46-50.

[9] B. Wang. A novel algorithm on BP-neural network [C]. 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, Hangzhou: 2012: 506-509.

收稿日期:2019-06-14

(上接第 204 页)

参考文献:

[1] SCOTT Jackson. 商用飞机系统工程[M]. 钱仲焱,赵越让,等,译, 上海:上海交通大学出版社,2016.

[2] 郜鹏飞. 浅谈民用飞机系统研制中的系统工程运用[J]. 工程技术,2015(24):84-85.

[3] 裘旭冬. 民用飞机系统工程实施方法[J]. 科技视界,2017(5):244-246.

[4] 贺东风,赵越让,钱仲焱,等.中国商用飞机有限责任公司系统工程手册[M]. 上海:上海交通大学出版社,2017.

[5] 李思宁,张世炯,李涛. 基于系统工程模型的飞机总装数字化集成工艺设计方法浅析[J]. 数字化柔性装配工艺设计与管理技术,2015(21):73-76.

[6] 张宗翔,肖素梅,石宇强. 基于产品特性的可再制造性评价研究[J]. 机械制造与自动化,2010,39(1):74-76.

[7] 刘红军,莫蓉,范庆明,等. 面向航空发动机叶片的可制造性评价方法[J]. 计算机集成制造系统,2009(15):1328-1335,1348.

收稿日期:2018-06-26

(上接第 210 页)

参考文献:

[1] 彭加强,马保仁. 冷试技术在发动机装配线的应用研究[J]. 装备制造技术,2014(4):118-121.

[2] 张朝辉. 发动机冷试技术[J]. 柴油机设计与制造,2012(12):50-23,56.

[3] 周洲,王冰. 发动机冷试测试技术的应用研究[J]. 制造业自动化,2015,19:19-22.

[4] 顾宝龙,赵振平,何泳,等. 一种应用于航空发动机测试的小型磁电式转速传感器[J]. 机械制造与自动化,2016,45(4):44-47.

[5] 林巨广,许华, 任永强,等. 发动机冷试关键技术的研究[J]. 机械设计与制造,2012(1):131-133.

[6] 姜树军. 冷试技术在发动机装配缺陷在线诊断方面的应用[D]. 济南:山东大学,2016.

收稿日期:2018-09-09