

双馈异步风力机 BP 神经网络空载并网控制

王嘉良

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:为减小双馈异步风力发电机组并网时对电网产生的冲击电流,降低电压误差,实现柔性并网,在双馈异步发电机数学模型的基础上,对基于定子磁链定向矢量控制的空载并网原理进行分析,利用 BP 神经网络对 PID 控制器的参数进行最优调节,建立 BP 神经网络 PID 空载并网控制策略;在 Matlab/Simulink 软件中建立双馈异步风力发电机 BP 神经网络 PID 空载并网的仿真模型。通过与普通 PID 空载并网控制仿真结果的比较表明,该控制策略的响应速度更快,对电网电压的跟踪能力更强,精度更高,是一种良好的并网控制策略。

关键词:双馈异步发电机;风力机;空载并网;PID 控制;BP 神经网络

中图分类号:TM315 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)02-0213-04

Double-fed Asynchronous Wind Turbine BP Neural Network No-load Grid-connected Control

WANG Jialiang

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

Abstract: In order to reduce the impulse current and voltage error and to realize pflexible grid connection of DFIG, the principle of no-load grid connection based on stator flux oriented vector control was analyzed through the mathematical model of DFIG. The parameters of PID controller were optimally adjusted by BP neural network. The strategy of BP neural network PID no-load grid connected control was proposed, and the simulation model of the doubly-ed asynchronous wind turbine BP neural network PID no-load grid connection was established by Matlab / Simulink software. By comparison with the ordinary PID no-load grid connected control simulation results, the new grid connected control strategy proves to be faster at response speed of the control strategy, stronger in ability to track the grid voltage and higher in degree of accuracy.

Keywords: doubly-fed induction generator; wind turbine; no-load grid connected; PID control; BP neural network

0 引言

据统计,地球上可开发利用的风能大约为 2×10^7 MW,从 20 世纪初开始,国际社会不断注重风力发电技术的发展^[1]。随着近 20 年的发展,风力发电系统的单机容量不断增大,主流机型逐渐发展为兆瓦级机组,在并网过程中风力发电机组的安全问题、对电网产生的电流冲击问题以及电能质量问题引起研究人员的重视^[2]。双馈异步风力发电系统由于使用的功率变流器较小,降低了成本,而且控制性能较高,因此成为风力发电中的一种主流机型。双馈异步风力发电系统主要有空载并网、独立负载并网和孤岛并网 3 种并网方式,其中空载并网由于结构简单且控制性能好,因此应用最为广泛^[3]。

文献[4]通过分析交流励磁变速恒频风力发电机组运行特点,研究了矢量并网控制技术,提出了基于定子磁链定向的空载并网策略,减小了并网时的冲击电流,但是对模型参数的要求比较高。文献[5]将电网电压定向矢量控制应用于空载并网策略中,该控制策略将定子磁链的

检测省去,减小了检测误差,降低了电网冲击。文献[6]将高阶滑模控制应用于电网电压定向的空载并网控制策略,消除控制量中的抖振,增强了鲁棒性,更有利于实现无冲击电流的快速并网。文献[7]在双馈异步发电机空载并网模型的基础上,介绍了一种自并网算法,并通过自主研发的试验平台进行仿真和试验研究,实现柔性并网。文献[8-10]分别利用变结构控制与全状态反馈线性化结合的控制策略^[8]、模糊控制^[9]和积分滑模控制^[10]实现发电机空载并网,且在并网后能够实现最大风能追踪以及有功功率与无功功率的解耦控制。文献[11]采用“空载-并网”两阶段控制的方案,实现“空载”和“并网”两个工作状态的平滑转移,并网过程中对电网电压的跟踪能力强,冲击电流小,并网后能够实现功率的解耦控制和最大风能追踪。

本文建立了双馈异步发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)同步坐标系下的数学模型,对空载并网的原理进行分析,通过 BP 神经网络调整 PID 控制器参数,实现转子侧电流对定子侧电压的有效最优控制,并建立仿真模型,通过仿真结果的对比,验证了所用控制方法的合理性和有效性。

1 双馈异步发电机空载数学模型

1.1 同步坐标系下 DFIG 的数学模型:

本文中双馈异步发电机采用电动机惯例。假设异步发电机具有三相平衡对称结构、定子和转子铁芯与铁损耗为线性关系,其数学模型为:

1) 定子侧和转子侧电压方程分别为:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega\psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega\psi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + p\psi_{dr} - (\omega_1 - \omega_r)\psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + p\psi_{qr} + (\omega_1 - \omega_r)\psi_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_{ds} 、 v_{qs} 、 v_{dr} 、 v_{qr} 分别是定子和转子在 dq 轴上的电压分量; R_s 、 R_r 分别是定子和转子绕组电阻; i_{ds} 、 i_{qs} 、 i_{dr} 、 i_{qr} 分别为定子和转子在 dq 轴上的电流分量; ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 、 ψ_{dr} 、 ψ_{qr} 分别为定子、转子在 dq 轴上的磁链分量; ω_r 、 ω_1 分别为转子角速度和同步角速度; p 为微分算子, $p = d/dt$ 。

2) 定子侧和转子侧磁链方程分别为:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_m 为励磁电感; L_s 、 L_r 分别为定子漏感和转子漏感。

3) 运动方程为:

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3)$$

式中: T_m 、 T_e 分别为发电机机械转矩、电磁转矩; J 为转子转动惯量。

4) 转矩方程为:

$$T_e = \frac{3n_p}{2} (i_{qs}\psi_{ds} - i_{ds}\psi_{qs}) \quad (4)$$

式中 n_p 为发电机极对数。

1.2 空载并网数学模型

当双馈异步风力发电机定子电压的幅值、频率和相位与电网电压的幅值、频率以及相位一致时,满足并网要求,在并网前后通过采用定子磁链定向向量控制策略来实现控制要求。采用发电机定子磁链定向,且忽略定子电阻,将定子磁链定向在 d 轴上,则磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = \psi_s = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)得定子电流为:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\psi_s - L_m i_{dr}}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{L_m i_{qr}}{L_s} \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(1)得:

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s \end{cases} \quad (7)$$

当双馈异步发电机在空载运行状态下时,定子电流为 0,

即 $i_{ds} = i_{qs} = 0$,电压方程和磁链方程简化为:

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} \\ v_{qr} = L_r \omega_s i_{dr} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$,为转差角速度。

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} \end{cases} \quad (9)$$

由于定子电阻与定子电感相比很小,因此通常可以忽略,在定子磁链定向的情况下,磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_s = L_m i_{dr} \\ i_{qr} = 0 \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

在双馈异步风力发电系统的空载并网控制中,电磁转矩为 0,不考虑变桨距控制,机械模块仅输入风速 V 。根据风力机的机械功率和机械转矩可得发电机的机械转速^[12]:

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \\ \omega_m = \frac{P_m}{T_m} \\ \omega_r = n_p \omega_m \end{cases} \quad (11)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为风轮半径; C_p 为风能利用系数; n_p 为发电机极对数。

2 BP 神经网络 PID 空载并网控制

BP 神经网络 PID 控制器由 BP 神经网络和经典的 PID 控制构成,本文采用 3 层 BP 网络结构^[13],选取 Sigmoid 函数为活化函数,被控对象由 PID 控制器实现闭环控制,PID 控制器的 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 由 BP 神经网络根据系统的运行状态,通过自学习和调整加权系数的方式进行在线调整,实现在稳定状态下系统最优控制的目的。BP 神经网络 PID 控制系统结构如图 1 所示。

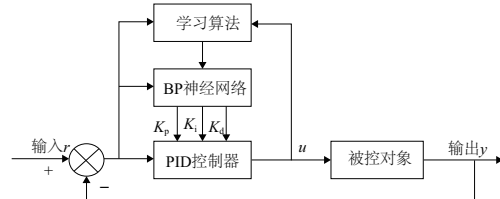


图 1 BP 神经网络 PID 结构图

本文采用的 BP 神经网络 PID 空载并网控制策略中,神经网络的输入值分别是:参考电流 i_r^* 、反馈电流 i_r 以及它们间的偏差值 e ,神经网络的输出即 PID 控制器的参数。通过 BP 神经网络算法的正向传播和反向误差传递不断调整其加权系数,得到 PID 控制器的最优参数,实现

PID 控制器的最优控制,在满足双馈异步发电机空载并网要求时实现并网。

当双馈异步发电机定子侧电压的幅值、频率、相位与电网电压的幅值、频率、相位都相同时,满足并网条件,发电机进行并网,电能传输到电网。在双馈异步发电机中,可以根据发电机的转速和电网电压调节发电机转子侧电流,实现对发电机定子侧电压的控制。在 BP 神经网络 PID 空载并网控制中,将实时检测到的三相电网电压信号经过磁链观测器得到转子励磁调节量,即电网电压相角 θ_u 和定子磁链幅值 ψ_s 。根据计算,将转子电流 d 轴分量

参考值 i_{dr}^* 、转子侧反馈电流 d 轴分量 i_{dr} 以及二者的误差作为控制器的输入,通过 BP 神经网络算法得到最优的 PID 控制器调节参数,经过 PID 控制器调节后得到转子侧电压 d 轴分量参考值 v_{dr}^* ;同理,转子电流 q 轴分量参考值 i_{qr}^* 、反馈电流 q 轴分量 i_{qr} 及二者误差经过最优调节后得到转子侧 q 轴电压分量 v_{qr}^* ,实现转子电流闭环控制。转子 $d、q$ 轴参考电压经过坐标变换后由变频器调节,产生驱动信号,调节转子电压,实现控制定子电压的目的。图 2 为 BP 神经网络 PID 控制框图。

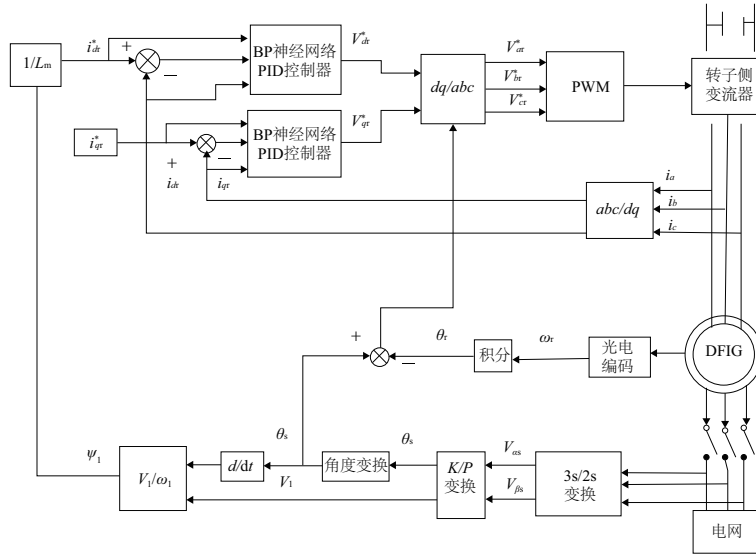


图 2 BP 神经网络 PID 控制框图

3 仿真分析

本文在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建了双馈异步发电机 BP 神经网络 PID 空载并网仿真模型(图 3),并与普通 PID 控制进行比较分析,以验证本文使用的并网控

制策略的有效性。双馈异步发电机的参数如下:额定功率为 1.5 MW,额定电压为 690 V,额定风速为 12 m/s,输入风速为 7 m/s,风轮半径为 31 m,空气密度为 1.225 kg/m³,风能利用系数为 0.48,发电机电极对数为 2,定子电阻为 2.65 MΩ,定子漏感为 0.168 7 MH,转子电阻为 2.63 MΩ,转子漏感为 0.133 7 MH,励磁电感为 5.474 9 MH。

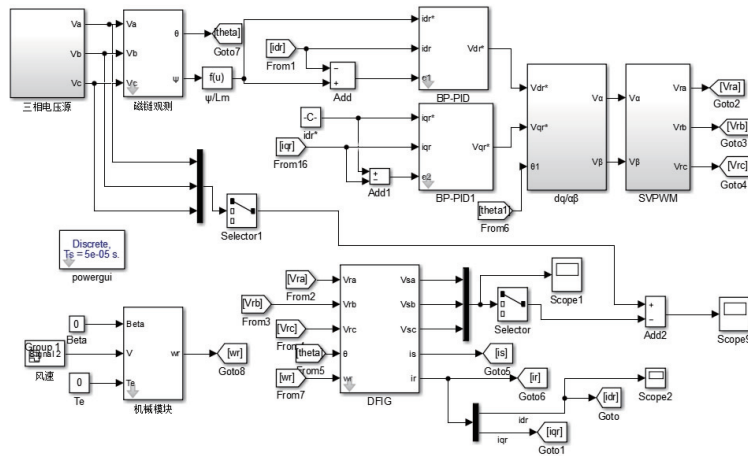


图 3 BP 神经网络空载仿真

在理想状态下,对双馈异步发电机进行仿真模拟。图 4 为电网电压曲线图,图 5 为 BP 神经网络 PID 控制策略

下定子侧电压曲线图,图 6 为普通 PID 控制策略下定子侧电压曲线图,图 7 为两种控制策略下电压误差曲线图,

图 8 为两种控制策略下转子电流 d 轴分量曲线图,图 9 为电网发生短暂波动时的电压曲线,图 10 为电压波动状况下的电压误差曲线图。

图 4-图 6 是在空载运行状态下,两种控制方式下电网电压和定子侧电压的仿真曲线图。从图 5-图 6 可见,定子侧电压从波动状态快速切换到与电网电压的幅值、频率和相位一致的稳定状态,达到并网要求。

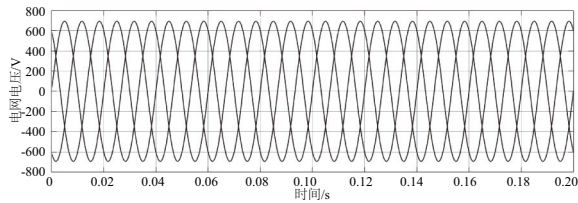


图 4 电网电压曲线

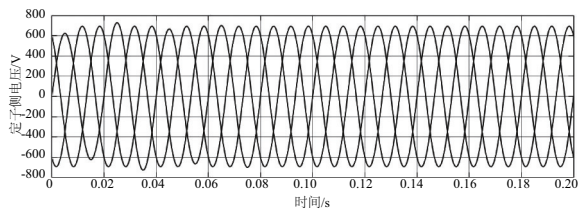


图 5 BP 神经网络 PID 控制定子侧电压曲线

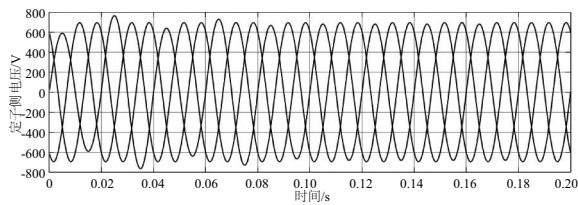


图 6 PID 控制定子侧电压曲线

图 7 为 BP 神经网络 PID 控制与普通 PID 控制空载并网时发电机定子电压与电网电压误差的输出曲线,由图可见 BP 神经网络 PID 控制策略的电压误差更小,电压波动的时间更短,达到并网要求的速度更快。在 0.08 s 时,电压误差值为 0,此时满足并网要求,完成并网。

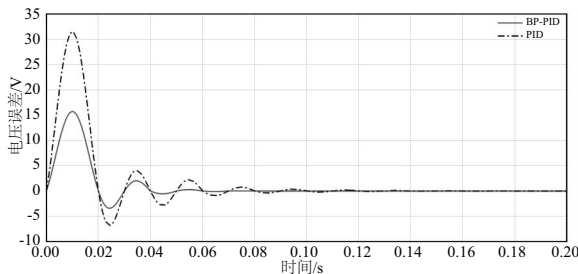


图 7 电压误差曲线

图 8 为两种控制策略的转子电流 d 轴分量的曲线图。在 BP 神经网络 PID 控制策略中,转子电流在 0.08 s 时达到稳定状态,普通 PID 控制策略在 0.18 s 时达到稳定状态;在满足空载并网要求的基础上,BP 神经网络 PID 控制的效果明显优于普通 PID 控制,电压

波动更小,较短的时间即可达到稳定状态,提高了系统的控制效率。

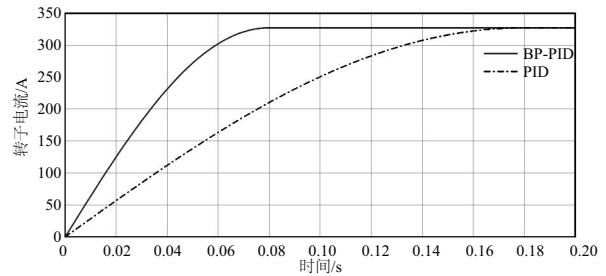


图 8 转子电流曲线

电网电压发生如图 9 所示的短暂波动,图 10 表示了两种控制策略的电压误差曲线,从误差曲线图可知,BP 神经网络 PID 控制策略在电网波动情况下对电网电压的追踪效果仍然良好,精度更高;而普通 PID 控制策略对电网电压的跟踪效果较差,电压误差波动较大,达到稳定状态的时间更长。

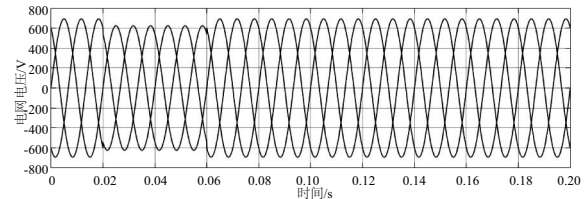


图 9 短暂波动时的电网电压曲线

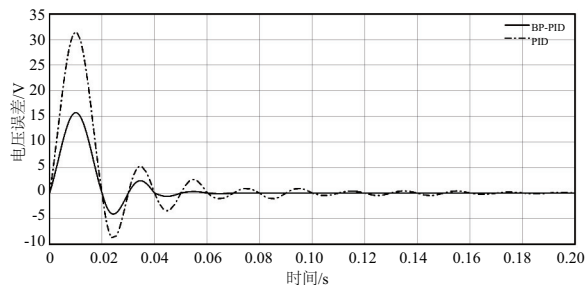


图 10 电压波动状况下的电压误差曲线

4 结语

本文在双馈异步发电机空载并网的基础上,利用 BP 神经网络调节 PID 控制器的参数,构建了 BP 神经网络 PID 空载并网控制。研究表明,在该控制策略下,定子电压对电网电压的追踪效果较好,电压误差快速趋近于 0,控制效果相比普通 PID 控制更优,是一种优良的并网控制策略。

参考文献:

- [1] 王宏华.风力发电技术系列讲座(1) 风力发电的原理及发展现状[J]. 机械制造与自动化,2010,39(1):175-178.
- [2] LI J H,FANG J K,WEN I,et al.Optimal trade-off between regulation and wind curtailment in the economic dispatch problem[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2015,1(4):37-45.

(下转第 221 页)

- NASA Special Publication, 2000; 4517.
- [10] SONG S Y, WANG W H, LU K, et al. Nonlinear attitude control using extended state observer for tilt-rotor aircraft [C]//The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC), Qingdao, China; IEEE, 2015; 852-857.
- [11] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005; 46-103.
- [12] 周杰, 王彪, 唐超颖. 基于状态空间模型预测算法的四旋翼无人机飞行控制[J]. 信息与控制, 2018, 47(2): 149-155.
- [13] 王彪, 周杰, 孔大庆, 等. 四旋翼飞行器航迹规划和控制研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 114-117.
- [14] 钱积新, 赵均, 徐祖华. 预测控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007; 72-73.

收稿日期: 2020-02-11

(上接第 212 页)

火时间随之增大,且头部间距为 72 mm 时,周向点火时间显著增加;随头部间距增加,流动加速系数减小,表示流动因素对火焰传播的作用减小。

表 1 周向点火时间及流动加速系数与头部间距比的关系

头部间距/mm	τ /ms	E
54(模型 A2)	26	2.95
60(模型 A1)	32	2.66
72(模型 A3)	57	1.79

3 结语

本文针对三头部燃烧室试验件,探究了燃烧室的周向点火过程以及流动与点火过程中火焰发展的关联,同时也探究了头部间距对周向点火过程的影响。得出了以下结论:

1) 燃烧室的周向点火过程具有阶段性,在初始火焰发展阶段,火焰首先顺着流线方向进行传递,待燃烧强度增大到一定值时,火焰才开始向其他区域延伸。

2) 在相同工况下,头部间距较小时,相邻旋流器之间的局部回流区相互影响增大,油气掺混效果增强。所以随头部间距由 54 mm 增加到 72 mm,燃烧室周向点火时间由 26 mm 增加到 57 mm,其中头部间距为 72 mm 时,周向点火时间显著增加。

3) 在相同工况下,随头部间距由 54 mm 增加到 72 mm,流动加速系数由 2.95 mm 减小到 1.79 mm,随头部间距增加,流动因素对火焰传播的作用减小了。

参考文献:

- [1] 李继保, 刘大响. 局部富油供油扩展燃烧室贫油点火熄火边界研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(2): 221-224.
- [2] 江洋. 燃烧室点火过程大涡数值模拟方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [3] SHAW R J. NASA's ultra efficient engine technology (UEET) program/aeropropulsion technology leadership for the 21st century [R]. Harrogate, UK; 22nd international congress of Aeronautical Sciences, 2000.
- [4] CORDIER M, VANDEL A, RENO B, et al. Experimental and numerical analysis of an ignition sequence in a multiple-injectors burner [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition, San Antonio, Texas, USA: 2013.
- [5] BARRÉ D, ESCLAPEZ L, CORDIER M, et al. Flame propagation in aeronautical swirled multi-burners: experimental and numerical investigation [J]. Combustion and Flame, 2014, 161(9): 2387-2405.
- [6] 叶沉然, 王高峰, 马承飏, 等. 斜喷环流环形燃烧室点火实验研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(11): 2549-2558.

收稿日期: 2020-02-28

(上接第 216 页)

- [3] 李建林, 赵栋利, 李亚西, 等. 几种适合变速恒频风力发电机并网方式对比分析[J]. 电力建设, 2006, 27(5): 8-10, 17.
- [4] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.
- [5] 郭家虎, 张鲁华, 马斌, 等. 变速恒频双馈风力发电机组的空载并网技术[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(3): 46-49.
- [6] 郑雪梅, 郭玲, 徐殿国, 等. 双馈感应发电机空载并网的高阶滑模控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 12-16.
- [7] 蔡慧, 潘全成. 双馈风电模拟系统空载并网控制与试验研究[J]. 电气自动化, 2018, 40(6): 34-37, 41.
- [8] 丁贵立, 王奔. 双馈感应风力发电机组的非线性变结构空载并网控制策略[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(5): 665-670.

- [9] 梁云峰, 谷凤民, 虎恩典, 等. 双闭环模糊 PI 控制的双馈发电机矢量控制系统[J]. 机械设计与制造, 2016(6): 139-142.
- [10] 刁亮, 王丹, 郭磊, 等. 双馈发电机空载并网的神经网络积分滑模控制[J]. 太阳能学报, 2017, 38(12): 3385-3391.
- [11] 兰飞, 姚知洋, 黎静华, 等. 双馈风力发电机空载并网运行控制建模与仿真研究[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 123-131.
- [12] 张建民. 智能控制原理及应用[M]. 北京: 北京冶金工业出版社, 2003.
- [13] WANG B. 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: 2020-12-29