

# 基于 RBF 神经网络的双馈风电机组 最大功率追踪控制方法

莫文水

(广西现代职业技术学院, 广西 河池 547000)

**摘要:**双馈风电机组通过转子回路进行功率调节控制,当系统在最大功率点附近工作时,回路电流会出现高频振荡的问题。这种振荡会影响系统稳定性,最大功率追踪控制是解决该问题的核心手段。提出基于径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络的双馈风电机组最大功率追踪控制方法。分析双馈风电机组基本结构与运行原理,获取风电机组输出功率,并将其输入 RBF 神经网络输入层中,通过网络隐含层对其展开优化训练,再通过输出层输出最大功率。采用二阶滑模控制策略与比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制器相结合的方法对发电机转矩展开追踪控制,实现对双馈风电机组最大功率的追踪控制,使风电机组保持最大功率运行。实验结果表明,所提方法追踪效果好、追踪精度高、控制精度高。

**关键词:**双馈风电机组;追踪控制;RBF 神经网络;二阶滑模控制策略;PID 控制器

中图分类号:TM 614

文章编号:1000-0682(2024)03-0105-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.019

## Research on maximum power tracking control method based on RBF neural network

MO Wenshui

(Guangxi Modern Polytechnic College, Guangxi Hechi 547000, China)

**Abstract:**The doubly fed wind turbine operates through a rotor circuit for power regulation control. When the system operates near the maximum power point, the circuit current will experience high-frequency oscillations. This oscillation will affect system stability, and maximum power tracking control is the core means to solve this problem. Propose a maximum power tracking control method for doubly fed wind turbines based on radial basis function (RBF) neural networks. Analyze the basic structure and operating principle of doubly fed wind turbines, obtain the output power of the wind turbine, and input it into the input layer of the RBF neural network. Optimize and train it through the hidden layer of the network, and then output the maximum power through the output layer. The method of combining second-order sliding mode control strategy with proportional integration differentiation (PID) controller is used to track the torque of the generator, achieving maximum power tracking control for doubly fed wind turbines and maintaining maximum power operation. The experimental results show that the proposed method has good tracking effect, high tracking accuracy, and high control accuracy.

**Keywords:**double fed wind turbines; tracking control; RBF neural network; second order sliding mode control strategy; PID controller

收稿日期:2024-01-16

基金项目:2023 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目“基于区块链与边缘计算的车联网数据安全传输关键技术研究”(2023KY1471)

第一作者:莫文水(1976—),男,壮族,广西东兰人,本科,副教授,研究方向为信息可视化、智能控制及优化。

## 0 引言

在风力发电系统中,双馈风电机组<sup>[1-2]</sup>是其重要组成部分,该性能可直接对整个风力发电系统的效率和稳定性产生影响。其中,最大功率追踪控制方法对于双馈风电机组的运行具有至关重要的作

用。通过有效地跟踪和调节风能转化过程中的最大功率点,可以最大限度地提高风电机组的发电效率。然而,回路电流的高频振荡问题会影响系统稳定性,对电网造成负面影响。因此,如何高效快速的对双馈风电机组最大功率展开追踪控制是当前需要研究的问题。

潘海鹏等人<sup>[3]</sup>建立发电系统输出功率模型,利用遗传算法对参数种群展开优化,获取最优发电系统参数。采用空间矢量控制算法控制完成发电系统最大功率跟踪控制。但是该方法在优化参数时容易无法全面搜索到最佳参数值,导致跟踪性能较差。买买提热依木等人<sup>[4]</sup>分析激励源-风速随机变化的特性,建立一个自然风数学模型,根据双馈风力发电系统中的风力机各部件建立数学模型,采用因果次序图的求逆规则推导出跟踪控制策略,完成最大功率跟踪控制。但该方法在跟踪期间,疏忽了控制策略所产生的系统稳定性问题,导致跟踪控制不稳定。Priyadarshi 等人<sup>[5]</sup>将 DC-DC ZETA 转换器用作太阳能光伏和直流负载之间的接口,连续调制转换器的占空比获得最大功率。构建一个控制器对最大功率展开追踪控制。但是该方法在对转换器的占空比展开连续调制的过程较为复杂,运算时间长,出现控制效率低的问题。Souhir<sup>[6]</sup>对风能系统展开建模,提取模型中的最大功率点;设计一个控制器,利用控制器调整降压-升压转换器的电压输入,实现最大功率跟踪;寻找风能系统的最优关系,根据最优关系实现最大功率控制。但是该方法容易引起继电保护装置误操作,出现变压器饱和问题。

因此,提出基于 RBF 神经网络的双馈风电机组最大功率追踪控制方法。

## 1 双馈风电机组输出功率获取

回路电流的高频振荡会导致系统不稳定,影响到风电机组的正常运行。通过获取风电机组的输出功率,可以及时观察和诊断回路电流振荡的情况,从而采取相应的措施来提高系统的稳定性。双馈风电机组结构如图 1 所示。

在双馈型风力发电系统中,其发电机定子连接到电网上,转子绕组根据变频器获得电力。这个变频器由两个主要部分组成:转子侧变流器和电网侧变流器。通过直流链节紧密相连,可协同工作,为转子提供电源。根据上述运行过程实现双馈风电机组在不同风速下的高效变速运行。

风电机组通过发电机定子与变流器可同时将功

率传输至电网中。设  $\varphi_a$  为定子磁场的同步转速,  $\varphi_b$  为转子转速,传输过程中会出现以下情况:

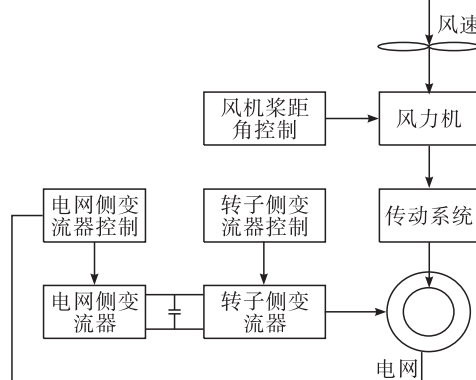


图 1 双馈风电机组结构图

(1) 当  $\varphi_a > \varphi_b$  时,变流器将功率通过转子侧传输至电网;

(2) 当  $\varphi_a < \varphi_b$  时,变流器从电网中吸收功率。

对风电机组的风能功率系数  $E_a(\lambda, \varepsilon)$  展开计算,计算公式如下所示:

$$\begin{cases} E_a(\lambda, \varepsilon) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\varepsilon - 5 \right) \alpha^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \lambda = \frac{\varphi_a R}{z_\beta} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $R$  为风轮半径;  $Z_\beta, \varepsilon$  为风速、桨距角;  $\alpha, \lambda$  为空气密度、叶尖速比。

根据风轮的空气动力学特性,双馈风电机组从风能中所获取的输出功率为  $P_t$ ,其计算公式如下所示:

$$P_t = 0.5 \pi \alpha E_a(\lambda, \varepsilon) R^2 z_\beta^3 \quad (2)$$

## 2 双馈风电机组最大功率预测

在双馈风电机组中,最大功率预测是实现优化控制和高效运行的关键环节。通过 RBF 神经网络对风电机组的功率输出进行预测,能够提前了解功率趋势并优化控制策略。预测的准确性有助于提高发电效率、增强系统稳定性。因此,在最大功率追踪控制之前采用 RBF 神经网络进行最大功率点预测至关重要,它为实现双馈风电机组的优化运行提供了重要的技术支撑。

根据获取  $P_t$ ,采用 RBF 神经网络<sup>[7-8]</sup>对其优化训练,实现对最大功率点的预测。设双馈风电机组功率  $P_t$  中存在  $n$  个功率数据点,即:

$$P_t = [p_1, p_2, \dots, p_n]$$

式中:  $n$  描述的是双馈风电机组功率数据点的个数;  $p_i$  描述的是第  $i$  个双馈风电机组功率数据点。

将双馈风电机组功率  $P_i$  中的功率数据点作为 RBF 神经网络的输入,通过输入层将其输入至隐含层中。

隐含层激活函数选取高斯函数  $g_i$ ,其表达式为

$$g_i = \exp\left(-\frac{\delta_i \|p_i - c_i\|^2}{2P_i s_i^2}\right)$$

式中: $c_i$ ,  $s_i$  为隐含层高斯函数中心向量与中心宽度; $\delta_i$  为连接权值。

经上述分析可知,RBF 神经网络具有良好的逼近性能。为了确保网络准确地预测双馈风电机组的最大功率点,需要经历两个阶段以确定和调整  $c_i$  和  $\delta_i$ 。这两个阶段分别为自组织学习阶段和监督学习阶段。

#### (1) 确定隐含层高斯函数中心向量

在自组织学习阶段,通过对已知数据进行聚类 and 聚类中心的计算,确定隐含层的高斯函数的中心向量。具体步骤如下:

① 在双馈风电机组功率  $P_i$  中随机选取  $m$  个功率数据点将其作为聚类中心  $c_i$ 。

② 对剩余的数据点,计算其与各个聚类中心的欧式距离  $d_i$ ,并将其分配到距离最近的聚类中心。

③ 对各个聚类集合  $\gamma_i$  中功率数据点的平均值展开计算,获取新的聚类中心  $c_i$ ,其计算公式如下所示:

$$c_i = \frac{1}{N_i} \sum_{p_i' \in \gamma_i} g_i p_i' \quad (3)$$

式中: $N_i$  描述的是聚类集合  $\gamma_i$  中功率数据点的总体个数。

④ 重复步骤 2 和 3,直到聚类中心  $c_i$  不再发生变化,表明所获取  $c_i$  是 RBF 神经网络隐含层最终的高斯函数中心向量。

通过上述步骤,可以确定 RBF 神经网络隐含层的高斯函数中心向量,使得网络能够更好地适应输入数据的分布特征。

#### (2) 调整连接权值

在确定了隐含层的高斯函数中心向量后,需要调整连接权值以实现精确的预测。这一步骤可以通过最小化目标函数来实现,具体步骤如下:

① 根据确定的隐含层与输出层的连接权值  $\delta_i$ ,计算网络的输出。

② 对目标函数  $J$  展开定义,该函数由数据点的误差信号组成,误差信号越小表示预测越准确。其计算公式如下所示:

$$\begin{cases} J = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N s_i^2 \\ s_i = d_i - \sum_{i=1}^l \delta_i g_i(p_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $N$  描述的是双馈风电机组功率数据点的个数; $s_i$  描述的是数据点误差信号; $k$  描述的是迭代次数。

③ 使用 RBF 算法根据  $J$  调整中心向量  $c_i'$ 、中心宽度  $s_i'$  与连接权值  $\delta_i'$ 。

④ 重复步骤 3,直到目标函数收敛。

通过上述步骤,可以逐步调整连接权值,使网络的输出尽可能接近期望输出。这一过程有助于提高 RBF 神经网络的预测精度和性能。

根据上述所调整的 RBF 神经网络隐含层参数,对双馈风电机组功率  $P_i$  展开优化训练,通过 RBF 神经网络输出层输出双馈风电机组最大功率  $V$ ,即  $V = c_i'(g_1'\delta_1' + g_2'\delta_2' + \dots + g_m'\delta_m')$ 。其中, $m$  表示 RBF 神经网络隐层神经元的个数。

通过上述步骤,RBF 神经网络能够实现对双馈风电机组最大功率点的准确预测。

### 3 最大功率追踪控制

在实际运行中,风速的波动性和不确定性可能导致实时功率数据存在误差和不确定性,从而影响控制器的性能。基于 RBF 神经网络的最大功率预测为这些控制策略提供了更为平滑和准确的输入,有助于提高控制精度和稳定性。依据预测的双馈风电机组最大功率  $V$ ,采用 PID 控制器与二阶滑模控制策略相结合的方法对发电机转矩展开控制,进一步实现对双馈风电机组最大功率的追踪控制,使风电机组保持最大功率运行。

将风电机组机械系统转换为一个两质量块模型,其表达式为:

$$\begin{cases} M_v \dot{\xi}_v = T_v - T_{ls} - G_v \xi_v \\ M_m \dot{\xi}_m = T_{hg} - T_r - G_m \xi_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: $M_v$ ,  $M_m$  为转子转动惯量、发电机转动惯量; $\dot{\xi}_m$  与  $\dot{\xi}_v$  为发电机转速; $G_v$  为转子外部阻尼; $T_{ls}$ ,  $T_r$ ,  $T_{hg}$  为低速轴转矩、发电机转矩、重力加速度。

将两质量块模型展开简化,构建单质量块模型,即:

$$\begin{cases} M_t \dot{\xi}_v = T_v - T_m - G_t \xi_v \\ M_t = M_v + N_m^2 M_m \\ G_t = G_v + N_m^2 G_m \\ T_m = N_m T_r \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $M_t$ ,  $G_t$ ,  $T_m$  为总转动惯量、总阻尼系数、转子侧发电机转矩。

采用 PID 构建滑模面, 设计一个 PID 控制器, 其计算公式如下所示:

$$\dot{U} + \varphi U = M_t \dot{\xi}_v k_p r(t) + k_\omega \int_{t_{ini}}^{t_{fin}} r(t) + k_\tau \dot{r}(t) \quad (7)$$

式中:  $\dot{U}$  描述的是滑模面一阶导数形式;  $U$  描述的是平衡点;  $t$  描述的是滑模面的变换趋势;  $\Phi$  描述的是正常数;  $k_p$  描述的是比例增益常数;  $k_\omega$  描述的是积分增益常数;  $k_\tau$  描述的是导数增益常数;  $r(t)$  描述的是风轮转速误差;  $t_{fin}$  描述的是滑模面最终状态下的取值;  $t_{ini}$  描述的是滑模面起始状态下的取值;  $\dot{r}(t)$  描述的是风轮转速误差变量的导数。

建立一个二阶滑模控制策略, 该策略由两部分组成: 等效控制  $U_{eq}$ , 切换控制  $U_{sw}$ 。  $U_{sw}$  可避免参数干扰,  $U_{eq}$  可追踪控制最大功率。二阶滑模控制策略的表达式为:

$$U(t) = \dot{U} [U_{eq}(t) + U_{sw}(t)] \quad (8)$$

采用 Lyapunov 理论验证滑模控制系统的收敛性, 给定一个连续的 Lyapunov 函数  $L(t)$  所需要满足的条件, 即:

$$\begin{cases} \sum_{|U(t)| \rightarrow \infty} W(t) = \infty \\ \frac{\partial}{\partial t} L(t) < 0, U \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $W(t)$  描述的是在  $t$  时刻系统状态空间上的一个实值函数。

根据连续的 Lyapunov 函数  $L(t)$  的满足条件, 可知风电机组系统会在平衡点  $U = 0$  时处于稳定状态, 此时  $\lim_{t \rightarrow \infty} U(t) = 0$ 。

根据公式(9)的条件, 选取 Lyapunov 函数  $L(t)$  作为二阶滑模控制策略的稳定性函数, Lyapunov 函数  $L(t)$  的计算公式为  $L(t) = \frac{1}{2} U^2(t) + \frac{1}{2} \dot{U}^2(t)$ 。

对 Lyapunov 函数  $L(t)$  展开求导, 得出  $\frac{\partial}{\partial t} W(t) = U(t) \dot{U}(t) + \dot{U}(t) \ddot{U}(t)$ 。其中,  $\ddot{U}(t)$  描述的是趋近律。

当上述过程满足公式(9)的条件时, 可通过发电机转矩  $M_t \dot{\xi}_v$  对风电机组转速跟踪最优转速展开控制调整。因此若要 Lyapunov 函数  $L(t) \leq 0$ , 则需要满足下述所描述的条件, 即:

$$U(t) \dot{U}(t) + \dot{U}(t) \ddot{U}(t) \begin{cases} < 0, U > 0 \\ = 0, U = 0 \\ > 0, U < 0 \end{cases} \quad (10)$$

可利用 sign 函数或者 tanh 函数定义趋近律  $\ddot{U}(t)$ , 使 Lyapunov 函数  $L(t)$  满足公式(9)所描述的条件, 即:

$$\begin{cases} \ddot{U}(t) = k \text{sign}(U) \\ \ddot{U}(t) = k \tanh\left[\frac{U}{\zeta}\right] \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\zeta$  描述的是 tanh 函数参数。

由于 sign( $U$ ) 会导致控制系统出现抖振, 因此可采用双曲正切函数 tanh 作为趋近律展开切换控制:

$$\ddot{U}(t) = k_{sw1} U + k_{sw2} \tanh[\dot{U}(t)] \quad (12)$$

式中:  $k_{sw1}$  与  $k_{sw2}$  描述的是切换控制的参数。

将公式(6)所获取的发电机转矩  $M_t \dot{\xi}_v$  代入公式(7)中, 可得:

$$\begin{aligned} & k_{sw1} U + k_{sw2} \ddot{U}(t) \tanh[\dot{U}] + \varphi(\psi \dot{r} + \dot{r}) \\ & = k_\rho \dot{r} + k_\omega r + k_\tau \dot{r} \left[ \xi_{ropt} - \frac{1}{M_t} (\dot{T}_v - N_m \dot{T}_r - G_t \dot{\xi}_v) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $\psi$  描述的是滑模面的斜率参数。

根据公式(13)可推导出发电机实际转矩  $T_r$  的控制律, 即:

$$\begin{aligned} Y = & \frac{(\dot{T}_v - M_t \ddot{\xi}_{ropt} - M_t \dot{\xi}_v)}{N_v} + \frac{M_t(\varphi\psi - k_\rho)}{(k_\tau - \varphi)N_v} \dot{r} - \\ & \frac{M_t k_\omega}{(k_\tau - \varphi)N_v} r + \frac{M_t [k_{sw1} U + k_{sw2} \tanh(\dot{U})]}{(k_\tau - \varphi)N_v} \end{aligned} \quad (14)$$

根据所获取的发电机实际转矩  $T_r$  的控制律  $Y$ , 实现双馈风电机组最大功率跟踪控制。

## 4 实验与分析

为了验证基于 RBF 神经网络的双馈风电机组最大功率追踪控制方法的整体有效性, 需要对其展开测试。置双馈风电机组最大功率追踪控制测试实验参数, 如表 1 所示, 实验环境如图 2 所示。

表 1 双馈风电机组相关参数

风电机组类型	双馈风电机组
额定功率	5 MW
额定转速	11.5 rpm
额定风速	11 m/s
测试风速范围	5 m/s 至 25 m/s

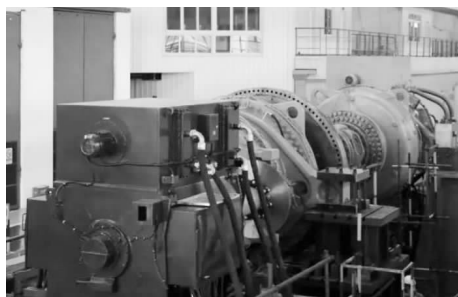


图2 双馈风电机组最大功率追踪控制实验环境

使用采集的数据,包括风速和对应的功率输出,通过 RBF 神经网络进行训练。设置 10 个高斯函数作为隐含层的中心向量,并使用误差反向传播算法进行监督学习阶段的优化训练。

#### 4.1 RBF 神经网络性能测试

为了对所提方法获取双馈风电机组最大功率的能力展开验证,计算网络当前最优值,对所提方法中 RBF 神经网络性能展开测试。

当前最优值描述的是在训练过程中,通过不断调整网络的参数,使得网络性能达到最佳状态的参数值。测试结果如图 3 所示。

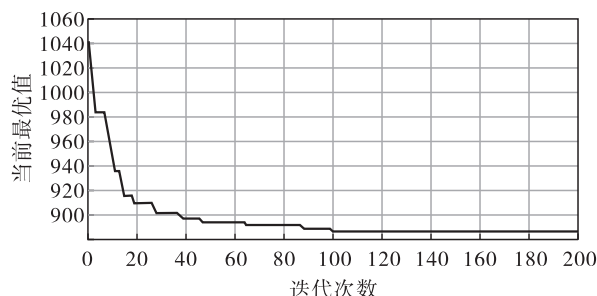
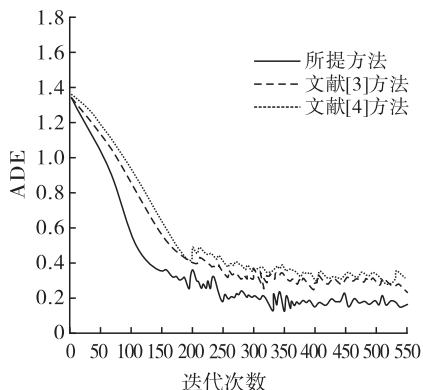


图3 RBF 神经网络优化性能图

图 3 中,随着迭代次数增加,当前最优值越小,表明 RBF 神经网络在处理输入数据时的性能表现



越优秀,且能够更好地学习和模拟输入数据之间的映射关系。

分析图 3 可知,所提方法的当前最优值为逐渐递减的状态,当迭代次数到达 40 时,当前最优值趋于平缓。这表明所提方法获取最大功率的能力较好,RBF 神经网络性能较高,验证了所提方法的有效性。

#### 4.2 双馈风电机组最大功率追踪测试

采用所提方法、文献[3]方法、文献[4]方法利用误差评价指标展开最大功率追踪性能测试。

误差评价指标有两种:ADE 与 FDE,分别表示的是追踪最大功率预测位置与实际位置的平均位移误差和最终位移误差。当两者的数值越小时,表明最大功率追踪性能越好;当 ADE 与 FDE 的数值越大时,表明最大功率追踪性能越差;当 ADE 与 FDE 的数值越小时,表明最大功率追踪性能越好。测试结果如图 4 所示。

ADE 的计算公式如下所示:

$$ADE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{pred} t = t} \sum_{obs+1}^{obs+t_{pred}} \sqrt{(x_t^i - \hat{x}_t^i)^2 + (y_t^i - \hat{y}_t^i)^2} \quad (15)$$

式中:\$(x\_t^i, y\_t^i)\$ 描述的是最大功率 \$i\$ 在 \$t\$ 时刻的真实位置;\$(\hat{x}\_t^i, \hat{y}\_t^i)\$ 描述的是最大功率 \$i\$ 在 \$t\$ 时刻的预测位置;\$t\_{pred}\$ 描述的是预测时长。

FDE 的计算公式如下所示,即:

$$FDE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_t^i - \hat{x}_t^i)^2 + (y_t^i - \hat{y}_t^i)^2} \quad (16)$$

式中:描述的是最大功率 \$i\$ 在 \$t\$ 时刻的真实位置;\$(\hat{x}\_t^i, \hat{y}\_t^i)\$ 描述的是最大功率 \$i\$ 在 \$t\$ 时刻的预测位置。

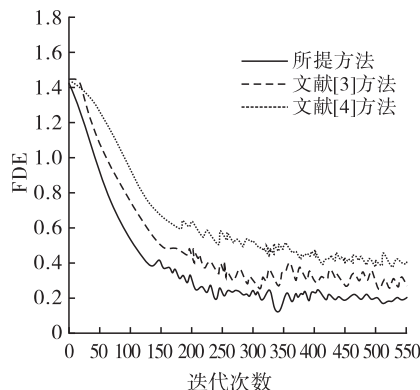


图4 不同方法的误差评价指标

根据图 4 所呈现的测试结果可以发现,所提方法的 ADE 值与 FDE 值对比于文献[3]方法和文献[4]方法,所提方法始终低于其他两种方法,这表明

所提方法在追踪双馈风电机组最大功率时的误差较小,追踪性能较高,验证了所提方法的有效性。这是因为所提方法在对双馈风电机组最大功率展开追踪



之前,对双馈风电机组基本结构与运行原理展开了分析,进一步提高了最大功率追踪性能。

#### 4.3 双馈风电机组最大功率控制效果测试

采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法,利用风能利用系数对双馈风电机组最大功率控制效果展开测试。当风能利用系数曲线越平滑、波动越小时,表明控制效果越好;风能利用系数曲线越振荡、波动越大,控制效果越差。

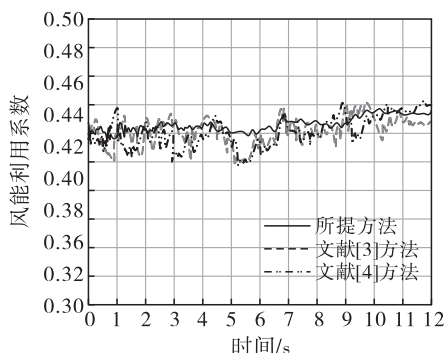


图5 不同方法的最大功率控制效果测试

根据图5所呈现的测试结果可以发现,所提方法的风能利用系数曲线呈现一种较为平稳的状态,振荡幅度较小,文献[3]方法和文献[4]方法的风能利用系数曲线呈现一种不平稳的状态,且振荡幅度较大。这表明所提方法的双馈风电机组最大功率控制效果较好,稳定性较高,验证了所提方法的有效性。

#### 4.4 双馈风电机组最大功率追踪精度测试

采用三种方法对双馈风电机组最大功率追踪精度展开测试,测试结果如图6所示。

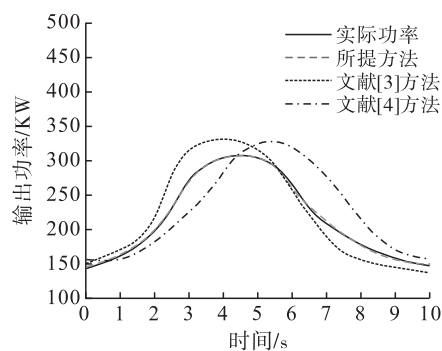


图6 不同方法的双馈风电机组最大功率追踪精度测试

根据图6所呈现的测试结果可以发现,所提方法所追踪的最大功率与实际最大功率相差较小,文献[3]方法和文献[4]方法所追踪的最大功率与实际功率相差较大,这表明所提方法所追踪的双馈风电机组最大功率的追踪精度较高。这是因为所提方法在控制双馈风电机组最大功率之前,利用 RBF 神

经网络对风电机组最大功率展开了预测,进一步提高了双馈风电机组最大功率的追踪精度。

## 5 结束语

针对目前双馈风电机组最大功率追踪控制方面所存在的问题,提出了基于 RBF 神经网络的双馈风电机组最大功率追踪控制方法。该方法分析了双馈风电机组的结构与运行原理,并对风电机组输出功率展开确定。再采用 RBF 神经网络优化训练输出功率,预测最大输出功率。利用 PID 控制器与二阶滑模控制策略追踪控制发电机转矩,完成最大功率追踪控制。实验结果表明,提方法在追踪双馈风电机组最大功率时的误差小,最大功率控制效果好,且追踪精度高。

#### 参考文献:

- [1] 聂永辉,刘天宇,蔡国伟,等. 基于 MP-RCC 的双馈风电机组低电压穿越控制研究[J]. 电网技术, 2022, 46(03): 905-914.
- [2] 刘华志,张祥宇,李永刚,等. 虚拟同步双馈风电机组的非线性联轴功率振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(04): 1449-1463.
- [3] 潘海鹏,丁海波,雷美珍,等. 基于遗传算法的直驱式海浪发电系统最大功率跟踪控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(03): 221-227.
- [4] 买买提热依木·阿布力孜,刘谨言,项志成,等. 因果图研究双馈风电系统最大功率跟踪控制[J]. 计算机仿真, 2022, 39(11): 100-103+426.
- [5] Priyadarshi, Neeraj, Padmanaban, et al. Internet of things augmented a novel PSO-employed modified zeta converter-based photovoltaic maximum power tracking system: hardware realisation[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(13): 2775-2781.
- [6] TOUNSI Souhir. New approach of maximum power point tracking for wind energy conversion system[J]. Wind Engineering, 2022, 46(6): 1735-1752.
- [7] 杨旭红,陈阳,贾巍,等. 基于 RBF 神经网络的电压外环滑模控制的 Vienna 整流器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 103-115.
- [8] 董昱,魏万鹏. 基于 RBF 神经网络 PID 控制的列车 ATO 系统优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(01): 103-109.
- [9] 吴丽珍,檀泽浩,郝晓弘,等. 基于梯度下降法的 DAB 变换器双重优化控制[J]. 电力电子技术, 2023, 57(07): 120-124.