

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2022.0005.006

双馈风机系统最大功率控制研究

张吴飞, 王双园, 李帅帅, 李嘉成

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200082)

摘要:我国乃至全球风力发电技术目前还不够成熟,在发电过程中存在很大的损耗。众多解决方法都存在着抗干扰性(即稳定性)较差,响应速度较慢的问题,难以精确迅速地跟踪最大功率点,实现双馈电机的最大输出,而且由于风力机响应时间常数大、精度低、动态调节能力差,风速检测比较困难,很难通过调节风力机转速实现最大风能追踪。为了解决这些问题,提出以双馈电机定子输出反馈给电网的功率最大为目标,建立基于电网电压定向下的 DFIG 数学模型,并在此模型基础上引入模糊控制,实现双馈电机最大功率点跟踪策略(把追寻双馈电机定子输出给电网电能最大控制策略统一称之为最大功率点跟踪策略)。最后,通过 MATLAB 进行仿真和实验不同风速条件下的动态调节性能,实现了双馈电机最大功率点跟踪的稳定性和灵敏度提高,并且在风速变化的情况下也能迅速进行最优控制。因此,该方法理论具备参考和利用价值。

关键词:风力发电;模糊控制;最大功率;双馈电机

中图分类号:TH133.3;TB115

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2022)05-0042-08

0 引言

传统的最大风能追踪是以风力发电机输出的机械功率最大为目标,忽略齿轮箱等带来的损耗,而双馈电机的输入功率即为风力机输出机械功率。刘凯等^[1]通过模糊控制对电机进行阻尼控制,发现模糊控制能够对电机进行较好的控制。孔旻玥等^[1]通过矢量与虚拟同步机分别控制,进行建模和分析,整个功率点寻优系统较为精确,但响应时间不足。李爽等^[3]通过 PSO 算法进行 PID 控制,整个控制的抗干扰性能显著提高,但反应时间仍然较长,灵敏度还不够。颜湘武等^[4]通过遗传算法解决了双馈电机故障穿越问题,但仍然存在寻优耗时较长的问题。秦继翔等^[5]通过寻优算法辨识调节器参数。Cheng X 等^[6-7]通过高灵敏度待辨别,低灵敏度不辨别的

方法辨识参数。以上研究虽成功解决了灵敏度问题,但却牺牲了一部分抗干扰性,当风速在复杂变化时,往往会使得 RMS 波动较大。Wang Y 等^[8-9]通过 WECC Type-4 型风机的模型,筛选出电气参数进行识别,可以较精准地识别到最大功率点,但波动性较大。本文摒弃传统以风力机输出机械功率最大建模而改用以双馈电机定子输出反馈给电网的功率最大为目标建立 DFIG 数学模型,根据此数学模型引入模糊控制,从而实现双馈电机最大功率点响应迅速,寻优稳定的跟踪策略。

1 最大功率点跟踪策略

1.1 基于电网电压定向下 DFIG 的数学模型

一般双馈风力发电矢量控制中有功、无功的解耦控制是通过定子磁链定向或者电网电压定向实现

收稿日期:2021-03-05;修回日期:2021-05-18.

作者简介:张吴飞(1995—),男,江苏南通人,硕士研究生,从事风力发电技术和故障诊断研究.

通讯作者:王双园(1986—),男,安徽合肥人,讲师,博士,从事风力发电系统、智能维护等研究. Email:sywang@usst.edu.cn.

的。定子磁链定向需要构建磁链观测器,增加了难度和复杂度,因此本文将以电网电压定向来实现解耦控制。将电网电压的矢量 \vec{u}_s 与同步旋转坐标系 d 轴重合,则:

$$\begin{cases} u_{sd} = |\vec{u}_s| = U_s \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_s 为电网电压矢量的幅值, u_{sd} 和 u_{sq} 为 dq 轴上定子电压分量。

由于双馈电机的定子侧输出是直接和电网相连接的,因此当电网电压保持不变,定子磁链在旋转 dq 坐标系下的分量是保持不变的,即使变化,也只是一个小的波动;而且,由于定子电阻值比较小,因此忽略定子绕组产生的电动势,定子电压的方程式为

$$\begin{cases} u_{sd} \approx -\omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} \approx -\omega_1 \psi_{sd} \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),可以得到:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = 0 \\ \psi_{sq} = -\frac{U_s}{\omega_1} \end{cases} \quad (3)$$

可见,定子磁链完全落在了 q 轴上, d 轴上的分量为0,定子输出电压与定子磁链互相垂直。将式(3)代入定子磁链方程(定理方程不过多阐述)可得:

$$\begin{cases} 0 = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ -\frac{U_s}{\omega_1} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)和转子磁链方程联立(定理方程不过多阐述),得:

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right) i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right) i_{rq} - \frac{L_m U_s}{\omega_1 L_s} \end{cases} \quad (5)$$

其中, ψ_{sq} 、 ψ_{sd} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 为 dq 轴上定、转子磁链的分量; i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 为 dq 轴上定、转子电流的分量; L_m 为同轴定、转子绕组在 dq 坐标系下的自感; L_s 为两相定子绕组在 dq 坐标系下的自感; L_r 为两相转子绕组在 dq 坐标系下的自感。

定义双馈电机漏感系数为 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$,则式(5)可以简化为

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_r \sigma i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_r \sigma i_{rq} - \frac{L_m U_s}{\omega_1 L_s} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可见,双馈电机转子侧的磁链在 dq 轴上的分量可单独由 dq 轴上转子电流分量来进行控制。

再将式(6)代入转子电压方程可得:

$$\begin{aligned} u_{rd} &= R_r i_{rd} + p \psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ &= R_r i_{rd} + L_r \sigma \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s \left[L_r \sigma i_{rq} - \frac{L_m U_s}{\omega_1 L_s} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} u_{rq} &= R_r i_{rq} + p \psi_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \\ &= R_r i_{rq} + L_r \sigma \frac{di_{rq}}{dt} + \frac{L_m}{\omega_1 L_s} \frac{dU_s}{dt} + \omega_s L_r \sigma i_{rd} \end{aligned} \quad (8)$$

R_s 、 R_r 为定、转子绕组的电阻, p 为微分算子,即 $\frac{d}{dt}$ 。由于电网电压恒定,因此 $\frac{dU_s}{dt} = 0$,所以转子电压方程表示为

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \sigma \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s \left[L_r \sigma i_{rq} - \frac{L_m U_s}{\omega_1 L_s} \right] \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \sigma \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s L_r \sigma i_{rd} \end{cases} \quad (9)$$

通过对双馈电机转子电压方程的简化,转子电压将无需用定子电流量来表示,虽然转子电压之间还是存在耦合,但是通过前馈补偿的方法,可以实现转子 dq 轴之间的解耦控制。

将式(3)、式(4)代入转矩方程(定理方程不过多阐述),可得简化后的转矩方程:

$$T_e = -\frac{L_m n_p U_s}{L_s \omega_1} i_{rd} \quad (10)$$

其中, T_e 表示电磁转矩, n_p 表示极对数,而有功、功率 P_s 、无功功率 Q_s 计算公式为

$$\begin{cases} P_s = U_s i_{sd} = -\frac{U_s L_m}{L_s} i_{rd} \\ Q_s = -U_s i_{sq} = \frac{U_s L_m}{L_s} i_{rq} + \frac{U_s^2}{\omega_1 L_s} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可见,通过电网电压定向以后,定子输出的有功功率 P_s 可以由转子电压的 d 轴分量 i_{rd} 单独控制,而无功功率 Q_s 则由电流 i_{rq} 单独控制,进而对有功、无功解耦控制。因此,可以通过改变转子电流的转矩分量实现双馈电机最大功率点跟踪策略。

1.2 最大功率点跟踪

当忽略铁芯损耗和所有杂散损耗时,定子的铜损耗将影响定子向电网的输出功率。图1为双馈电机内部功率流向图,由于当双馈电机的转速处于超同步或亚同步时,电机转子的功率流向是不同的,因此图1(a)为亚同步速时的功率流向图,转子此时处

于电动状态;图 1(b)为超同步速时的功率流向图,此时转子侧进行发电。

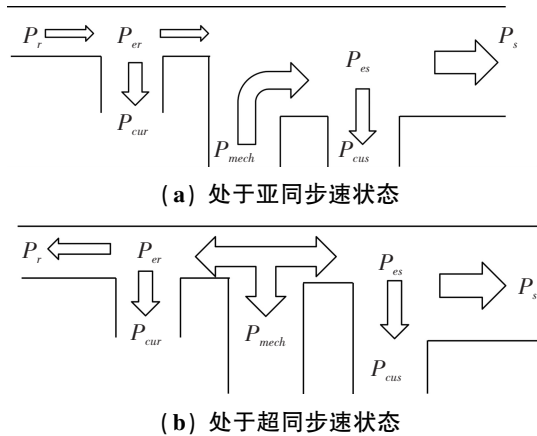


图 1 双馈电机内部功率流向图

Fig. 1 Internal power flow diagram of doubly-fed motor

图 1 中 P_r 、 P_{er} 、 P_{cur} 分别为转子侧输入电功率、转子侧电磁功率和转子侧铜耗; P_s 、 P_{es} 、 P_{cus} 分别为定子侧输出功率、定子侧电磁功率和定子侧的铜耗; P_{mech} 为双馈电机轴上输入的机械功率,由于忽略了机械转轴上的损耗,因此双馈电机的电磁功率 $P_e = P_{mech}$, 所以:

$$P_{es} : P_{er} : P_{mech} = \frac{1}{1-s} : \frac{s}{1-s} : 1 \quad (13)$$

根据功率的流向图,双向电机定子输出有功功率 P_s 等于定子侧的电磁功率 P_{es} 减去定子侧的铜耗 P_{cus} :

$$P_s = P_{es} - P_{cus} \quad (14)$$

将式(13)代入式(14),则:

$$P_s = \frac{P_{mech}}{1-s} - P_{cus} = \frac{P_{mech}}{1-s} - (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) R_s \quad (15)$$

对式(12)进行变化,可得:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{P_s}{U_s} \\ i_{rq} = -\frac{Q_s}{U_s} \end{cases} \quad (16)$$

将定子电流的表达式(16)代入式(15)可得:

$$\frac{R_s}{U_s^2} P_s^2 + P_s + \frac{R_s}{U_s^2} Q_s^2 - \frac{\omega_1}{\omega_r} P_{mech} = 0 \quad (17)$$

定子输出有功功率 P_s 的值与无功功率 Q_s 、双馈电机的输入功率 P_{mech} 和双馈电机的电角速度 ω_r 有关。 P_s 的大小取决于 Q_s 、 P_{mech} 和 ω_r 这 3 个变量的值。由于 P_{mech} 即为风力机输出的机械功率,因此 P_{mech} 和 ω_r 的关系满足图 2 风力机输出功率-转速曲线图, $\omega_r = N\omega_w n_p / 9.55$, N 为齿轮箱增速比。

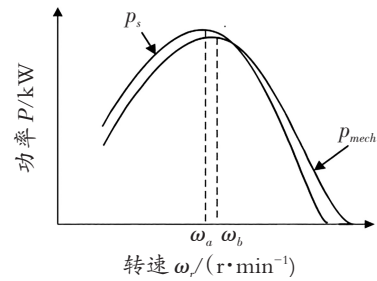


图 2 同一风速下风能曲线 P_{mech} 及定子输出功率曲线 P_s

Fig. 2 Wind energy curve P_{mech} and stator output power curve P_s at the same wind speed

1.3 无功功率的取值

无功功率 Q_s 影响着有功功率 P_s 的值,因此为了研究双馈电机的最大功率点跟踪策略,必须对双馈电机定子输出的无功做分析。在分析无功之前,首先对双馈电机内部的损耗做一定的分析。因为忽略了电机的铺铁芯损耗和一切内部杂散损耗,因此:

$$P_{loss} = P_{cus} + P_{cur} = (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) R_s + (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) R_r \quad (18)$$

当双馈电机内部损耗最小时,此时定子侧的输出无功功率为

$$Q_s = \frac{L_s R_r U_s^2}{\omega_1 R_s L_m^2 + \omega_1 R_s L_s^2} \quad (19)$$

当 P_{loss} 的值为最小时,定子无功输出 Q_s 只与电网以及电机的参数有关,与双馈电机的运行状态以及励磁电流大小无关,所以当电网电压恒定,忽略一切由于外界环境变化或者电机高速运行引起的电机参数变化的因素,则双馈电机内部损耗最小时,定子输出无功功率为一恒定值。

通过电网电压定向,能使双馈风力发电实现有功、无功解耦控制,一般双馈电机无功功率给定值 Q_s^* 的取值以单位功率因素发电为目标,因此无功给定值 Q_s^* 为 0。其实 Q_s^* 的计算方法有多种。比如,当以电力系统运行性能为目标,则为了优化电力系统的稳定性和调节能力,可以计算出所需要的双馈电机参考无功 Q_s^* 的值,例如当以单位功率发电,则 DFIG 的无功给定 Q_s^* 为 0;另一方面,也可以考虑以双馈电机运行效率最佳为目标计算无功的给定值,例如以双馈电机运行损耗最小为目标,计算出此时的无功给定值 Q_s^* 。

本文将以双馈电机内部损耗最小为目标,得到最佳的无功功率给定值。由于通过电网电压定向,实现了双馈电机发电时定子输出有功、无功功率的解耦控制,因此根据式(12),单独控制转子电流 q

轴分量 i_{rq} , 可以控制无功 Q_s 的大小。

1.4 最大功率点跟踪曲线

通过式(19)确定了无功功率 Q_s 的值,再通过式(17)可以计算得到双馈电机定子反馈给电网的功率 P_s 的大小,每一组 (P_{mech}, ω_r) 可以确定一个 P_s 的值。而 (P_{mech}, ω_r) 可以根据风力机输出功率和转速变化之间关系,计算出不同风速变化下,双馈电机定子反馈给电网功率 P_s 的大小, P_s 的变化如图 3 所示。

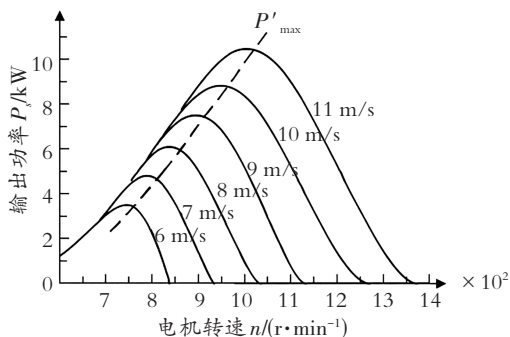


图 3 11 kW 双馈电机定子反馈电网功率变化曲线
Fig. 3 Power variation curve of 11 kW doubly-fed motor stator feedback grid

图 3 为 11 kW 双馈电机反馈电网的功率 P_s 变化曲线图,其中最大功率点曲线为 P'_max 。功率变化曲线 P_s 与风能变化曲线 P_{mech} 相似,只是在同一风速下,最大功率点和最大风能点不同。若双馈电机能运行在曲线 P'_max 上,则能实现本文所提出的最大功率点跟踪策略。

传统的解决方法为计算出最大功率变化曲线 P'_max 的表达式,在不同风速下,得到最大功率点对应的发电机转速 n ,利用转速闭环控制,实现对有功功率的调节,从而实现最大功率点跟踪策略。

然而 P'_max 曲线的计算是相当繁琐的,而且风力发电现场环境复杂,理论上的风能变化曲线往往不能代表真实的风力发电情况,因此传统的方法误差比较大。模糊控制技术凭借其抗干扰能力强,适用于时变、非线性系统,且无需建立被控对象的数学模型,如今被广泛运用于工业控制中。因此,本文将利用模糊控制去实现双馈电机最大功率发电,避免了去计算曲线 P'_max 。

2 基于模糊控制器的控制策略

2.1 模糊控制器设计

将上述提出的最大功率点跟踪策略与模糊控制原理相结合,建立最大功率追踪模糊控制器,通过调

节双馈电机的转速来实现最大功率发电的目标^[2]。如图 4 所示为模糊控制器框图。

双馈电机定子输出功率 P_s 与机械转速 n 的关系如图 3 所示,因此在某一风速下,通过改变 n 的值,可以搜索到最大输出功率 $P_{s(max)}$ 。图 4 中 ω_r 为转速角速度, P_o 即 P_s 。模糊控制的原理是:随着旋转角速度 ω_r^* 的增加(或减小),通过计算可以得到输出功率 P_o 的增加(或减小)量。如果 ΔP_o 为正,最后的 $\Delta\omega_r^*$ ($L\Delta\omega_r^*$) 也为正,那么搜索沿着同一方向继续;反之如果转速继续沿同一方向增加,导致了 ΔP_o 为负,则改变搜索方向。因此通过不断搜索 ω_r ,可以使输出功率 P_o 稳定运行在最大功率点,当系统处于最佳工况时, ω_r 的值会有小幅震荡。

图 4 中 KWR 和 KPO 为发电机转速 ω_r 的量化因子, KWR 和 KPO 的产生是通过模糊计算得到的,他们的值随转速的增加而增加。当确定了速度的隶属度之后,利用量化因子计算规则表,得到相应的 KWR 和 KPO 的值。

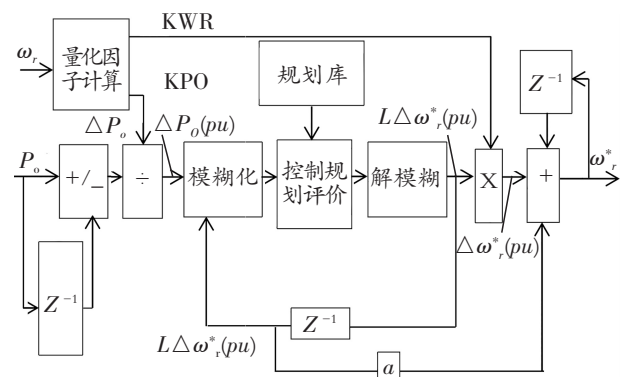


图 4 模糊控制器框图

Fig. 4 Block diagram of fuzzy controller

利用量化因子 KPO,计算出 $\Delta P_o(pu)$ 的值,再通过图 5(a)、图 5(b)所示的 MF 得到 $\Delta P_o(pu)$ 和 $L\Delta\omega_r^*(pu)$ 相应的隶属度值,利用模糊规则矩阵,得到了 $\Delta\omega_r^*(pu)$ 的隶属度,最后通过解模糊,计算出对应的转速 ω_r^* 。其中,NS 表示负小,NB 表示负大,NM 表示负中,ZE 表示零,PS 表示正小,PM 表示正中,PB 表示正大,N 表示 Negative,P 表示 Positive。根据模糊推理规则,采用重心法进行解模糊从而得到 $\Delta\omega_r^*(pu)$ 。图 4 中,对 $\Delta\omega_r^*(pu)$ 进行 Z 变换得 $L\Delta\omega_r^*$,为了避免转矩波动产生的局部最小,将 $L\Delta\omega_r^*$ 的一部分加入 $\Delta\omega_r$ 中。

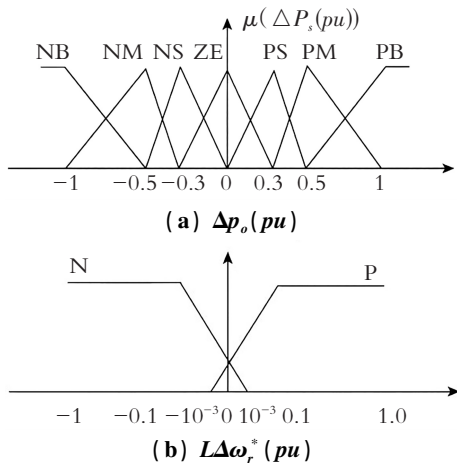


图 5 模糊变量的隶属度函数

Fig. 5 Membership function of fuzzy variables

2.2 最大功率点追踪控制策略

经过电网电压定向,实现了对双馈电机定子侧输出功率的有功、无功解耦控制,再利用定子输出有功 P_s 曲线具有单峰特性,通过最大功率追踪模糊控制器,搜索到最大功率处的电机转速,进行转速闭环控制,从而实现了双馈电机最大功率馈电控制。

在整个双馈风力发电系统中,核心部分是控制算法。当系统实现并网控制,则下一步要进行最大功率追踪控制,从而实现整个机组的最优状态发电。因此,控制策略的正确性将影响整个发电系统的运行状态及性能。本文选择使用模糊控制器,也是为了能使整个机组响应速度快、抗干扰性能强。

结合有功、无功解耦控制原理,模糊控制原理以及最大功率点跟踪原理,可得到整个双馈风力发电系统外环为有功功率环,内环为无功功率环。外环中:将双馈电机定子输出有功功率作为模糊控制器的输入,输出为转速给定值 ω_r^* ,通过转速闭环、PI 调节,得到转子有功电流给定值 i_{rd}^* ,再与实测有功电流 i_{rq} 做闭环控制,PI 调节输出量加上前馈补偿量从而得到转子电压指令 $u_{rd}^{[11]}$,外环中实现了转速、电流的双闭环控制;内环中:利用得到的最佳无功功率 Q_s^* ;计算出无功电流给定值 i_{rq}^* ,通过电流单闭环控制再加上前馈补偿量得到转子电压指令 u_{rq} 。通过坐标变换,将 u_{rd} 、 u_{rq} 变换到两相静止坐标系下,把两相静止坐标下转子电压分量 $u_{r\alpha}$ 、 $u_{r\beta}$ 作为 SVPWM 模块的输入信号去产生 SV 信号以控制转子侧变换器,从而实现双馈电机的最大功率发电。

3 仿真与实验

为验证最大功率追踪控制策略的正确性,在

MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真模型,进行仿真验证。仿真所使用的双馈电机参数为:额定功率 $P=11$ kW,极对数 $n_p=3$,定子电阻 $R_s=1.95$ Ω ,定子自感 $L_s=0.267$ H,转子电阻 $R_r=1.45$ Ω ,转子自感 $L_s=0.267$ H,互感 $L_m=0.258$ H,参数均已折算到定子侧,定、转子都为 Y 型连接。

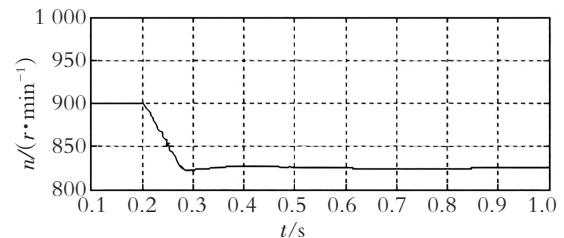
风速为 6 m/s 及 8 m/s,双馈风力发电系统运行在最大功率点时,双馈电机的运行参数见表 1。

表 1 最大功率点的运行参数

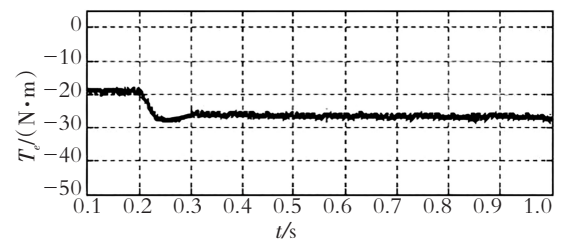
Table 1 Operating parameters of maximum power point

风速 $v/$ ($m \cdot s^{-1}$)	转速 $n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	电磁转矩 T_e ($N \cdot m$)	定子有功 P_s/kW
6	825	-25	2.8
8	950	-57	6

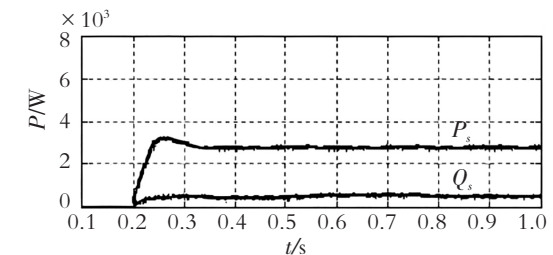
图 6(a)、图 6(b)、图 6(c),分别为风速 6 m/s 时,双馈电机的转速、电磁转矩和定子侧反馈给电网功率曲线图。由于在追寻最大功率点前,先要实现双馈电机的并网控制策略,因此仿真的 0.2 s 前为并网控制,此时定子尚未与电网相连,认为此时的 $P_s=0$ W。



(a) 双馈电机转速



(b) 双馈电机转矩



(c) 双馈电机定子输出有功、无功变化曲线

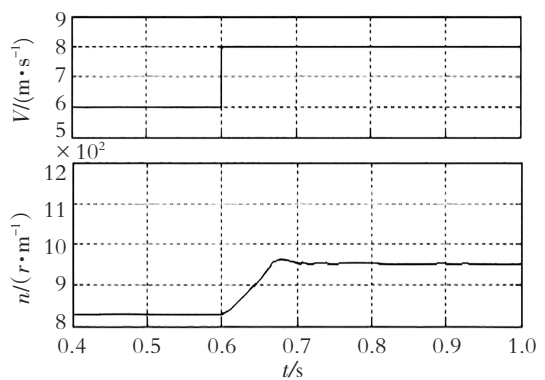
图 6 风速 6 m/s 时的运行参数

Fig. 6 Operating parameters when wind speed is 6 m/s

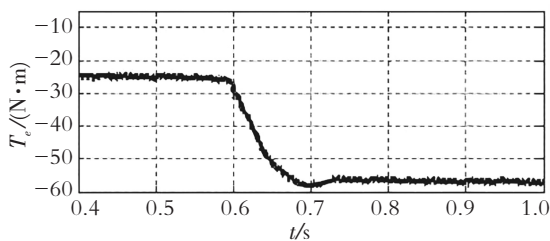
在 0.2 s 前,系统进行并网控制,因此图 6(a)、

图 6(b)中 0.1~0.2 s 为并网时候的双馈电机转速和电磁转矩。0.2 s 起系统开始追踪最大功率,从并网状态到最大功率发电状态,是转速减小的过程,说明模糊控制器是反向搜索电机转速,最后电机转速稳定在 $n=825/(r \cdot \text{min}^{-1})$ 时,系统追寻到了最大功率点,并稳定运行在最大功率发电状态。图 6(c)中,0.1~0.2 s 期间,定子反馈给电网功率为 0 W,因为此时双馈电机尚未实现并网,定子未与电网相连,因此定子输出给电网的有功、无功都为 0。0.2 s 以后并网成功,开始进行最大功率点跟踪控制,当系统运行稳定后,定子反馈给电网的有功 $P_s \approx 2.8 \text{ kW}$,无功 $Q_s \approx 775 \text{ W}$ 。无功功率是通过双馈电机内部损耗最小为目标确定的,利用式(17)计算出无功给定值 $Q_s^* = 763 \text{ W}$ 。所以无功功率很好地跟随了给定值,而有功 P_s 则实现了定子最大功率发电,与表 1 的数据一致。双馈风力发电系统能很好地运行在最大功率状态,说明模糊控制器设计的正确性,模糊控制规则适用于本系统。

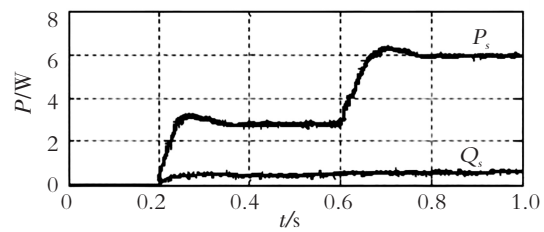
在稳定风速下,双馈风力发电系统通过模糊控制器的在线搜索,能稳定运行在最大功率发电状态,下面将通过仿真验证风速从 6 m/s 变化到 8 m/s 时,系统能否始终追踪最大功率。如图 7 所示为风速变化下双馈电机的运行参数。



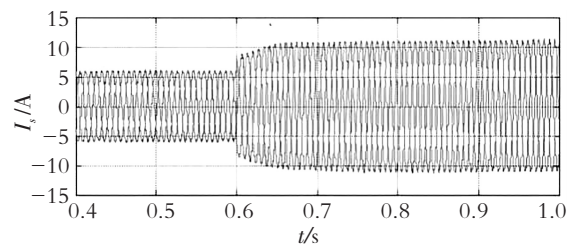
(a) 双馈电机转速变化曲线图



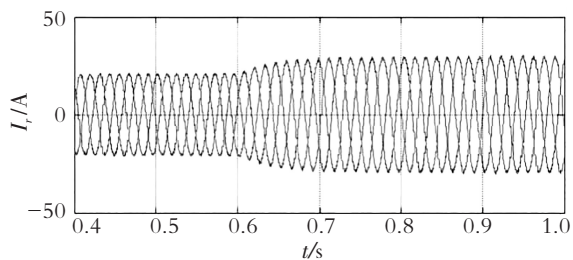
(b) 双馈电机转矩变化曲线图



(c) 双馈电机定子反馈给电网的功率



(d) 双馈电机定子输出电流的变化曲线图



(e) 双馈电机转子侧电流变化曲线图

图 7 风速变化下双馈电机运行参数

Fig. 7 Operating parameters of doubly-fed motor under wind speed change

如图 7(a)、图 7(b)所示,0.6 s 处风速变化,整个发电系统具有较强的动态调节能力。双馈电机能快速地稳定运行在最佳转速,电磁转矩的调节响应时间较短,超调量较小,系统的鲁棒性好。图 7(c)所示的定子输出功率 P_s 的值从 2.8 kW 变化到 6 kW,与表 1 的最大输出功率数据基本吻合,说明双馈风力发电系统风速变化前后始终稳定运行在最大功率输出点,最大功率追踪控制策略是正确的。

而定子输出无功 Q_s 的值在风速变化前后都稳定在 775 W 上下,实现了有功、无功的解耦控制。图 7(d)为定子侧的输出电流曲线,由于实现并网后,双馈电机定子与电网相连,因此风速的变化只会造成定子电流幅值的变化,频率始终为工频 50 Hz。图 7(e)为双馈电机转子励磁电流变化曲线,通过对励磁电流频率、幅值、相位的调节,达到双馈电机变速恒频、并网控制、最大功率追踪控制等目的。

图 8 为模糊控制器在风速变化时输出转速变化

曲线图。在风速变化前后,模糊控制器的响应时间较短,能快速地搜索到不同风速下的最佳转速,虽然转速值有一定的超调量,但是不会影响系统的稳定性。

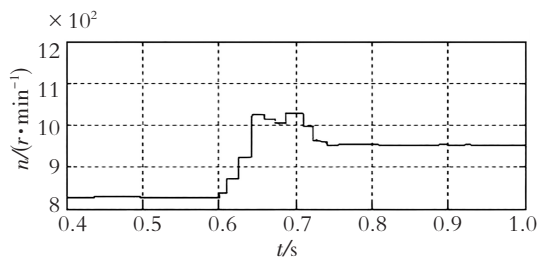


图 8 风速变化时模糊控制器的转速输出变化

Fig. 8 Variation of speed output of fuzzy controller when wind speed changes

从图 6 可以看出在稳定风速下,双馈风力发电系统通过模糊控制器的在线搜索,能稳定运行在最大功率馈电状态。从图 7 和图 8 可以看出,在风速变化的情况下本最优结果追踪系统能快速响应并且稳定在最优解,从而实现最大功率追踪控制。

4 结束语

首先利用电网电压定向的方法,实现了双馈电机定子输出有功、无功功率 P_s 和 Q_s 的解耦控制。由于双馈电机内部损耗的存在,提出了不以风力机输出风能最大为目标,而以双馈电机定子反馈给电网的有功功率 P_s 最大为目标,通过建立模糊控制器,实现系统追寻最大功率发电的控制策略。同时,无功功率给定的取值将以双馈电机内部损耗最小为最优原则,计算出 Q_s^* 的值,当然这个无功值能确保电网能够稳定、安全地运行。最后,通过仿真与实验成功论证了本文所提理论的正确性。

参考文献 (References):

- [1] 刘凯,张英敏,李兴源,等. 基于振荡暂态能量下降的 VSC-HVDC 双侧模糊无功阻尼控制器设计[J]. 电网技术,2016,40(4):1030—1036.
LIU Kai,ZHANG Ying-min,LI Xing-yuan,et al. Design of two-side fuzzy reactive power damping controller for VSC-HVDC based on the decrease of oscillating transient energy [J]. Power Grid Technology,2016,40(4):1030—1036.
- [2] 孔旻玥,孙丹,年珩. 双馈风电机组系统功率响应特性建模方法[J]. 电力系统自动化,2021,46(2):1—11.
KONG Min-yue,SUN Dan,NIAN Heng. Power response characteristic modeling method of doubly-fed wind turbine system[J]. Automation of Electric Power System,2020,46(2):1—11.
- [3] 李爽,王志新,王国强. 基于改进粒子群算法的 PIDNN 控制器在 VSC-HVDC 中应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(3):14—21,120.
LI Shuang,WANG Zhi-xin,WANG Guo-qiang. Application of PIDNN controller based on improved particle swarm optimization algorithm in VSC-HVDC[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2013,33(3):14—21,120.
- [4] 颜湘武,崔森,孙雪薇,等. 双馈风力发电机组全运行工况与快速启动电磁暂态建模[J]. 电网技术,2021,45(4):1—15.
YAN Xiang-wu,CUI Sen,SUN Xue-wei,et al. Modeling of full operating condition and fast-start electromagnetic transient of doubly-fed wind turbine [J]. Power Grid Technology,2021,45(4):1—15.
- [5] 秦继翔,贾科,孔繁哲,等. 基于寻优算法的永磁风电机组并网逆变器故障穿越控制参数分步辨识[J]. 中国电机工程学报,2021,41(S01):1—13.
QIN Ji-xiao,JIA Ke,KONG Fan-zhe,et al. Step identification of fault crossing control parameters of grid-connected inverter of permanent magnet wind turbines based on optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(S01):1—3.
- [6] CHENG X,LEE W,SAHNI M,et al. Dynamic equivalent model development to improve the operation efficiency of wind farm[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2016,52(4):2759—2767.
- [7] MOGHADDAM N,SALAMI Z,EASTER L,et al. Sensitivity analysis of an excitation system in order to simplify and validate dynamic model utilizing plant test data[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2015,51(4):3435—3441.
- [8] WANG Y,LU C,ZHU L,et al. Comprehensive modeling and parameter identification of wind farms based on wide-area measurement systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2016,4(3):383—393.
- [9] 潘学萍,高远,金宇清,等. 风电机组驱动系统参数辨识[J]. 电网技术,2013,37(7):1990—1994.
PAN Xue-ping,GAO Yuan,JIN Yu-qing,et al. Parameter identification of drive system for fixed-speed wind power

- generation units[J]. Power System Technology, 2013, 37(7):1990—1994.
- [10] 刘宗锋,荣德慧,王世国,等. 永磁同步电机模糊 PID-内模控制系统研究[J]. 机械设计与制造, 2021(9): 85—89.
- LIU Zong-feng, RONG De-hui, WANG Shi-guo, et al. Research on fuzzy PID-internal mode control system of permanent magnet synchronous motor [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(9):85—89.
- [11] 戈宝军,牛焕然,林鹏,等. 多跨距无刷双馈电机转子绕组设计及特性分析[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(6):37—45.
- GE Bao-jun, NIU Huan-ran, LIN Peng, et al. Rotor winding design and characteristics analysis of multi-span brushless doubly-fed motor[J]. Chinese Journal of Electrical Machinery and Control, 2021, 25(6):37—45.

Research on Maximum Power Control of Doubly-fed Wind Turbine System

ZHANG Wu-fei, WANG Shuang-yuan, LI Shuai-shuai, LI Jia-cheng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Technology, Shanghai 200082, China)

Abstract: Wind power generation technology in China and the world is still not mature, and there is a lot of loss in the process of power generation. Many solutions have poor anti-interference (stability) and slow response speed, which makes it difficult to accurately and rapidly track the maximum power point and achieve the maximum output of the doubly-fed motor. Moreover, wind speed detection is difficult due to the large response time constant, low precision and poor dynamic adjustment ability of the wind turbine. It is difficult to achieve maximum wind tracking by adjusting wind turbine speed. In order to solve these problems, a DFIG mathematical model based on grid voltage orientation is established with the goal of maximizing the output power fed to the grid by the stator output of the doubly-fed motor, and fuzzy control is introduced on the basis of this model, so as to achieve maximum power point tracking strategy of doubly-fed motor. The control strategy of tracing the maximum power output from the stator of the doubly-fed motor to the grid is called the maximum power point tracking strategy. Finally, MATLAB is used to simulate and test the dynamic regulation performance under different wind speed conditions, and the stability and sensitivity of the maximum power point tracking of the doubly-fed motor are improved, and the optimal control can be quickly performed in the case of wind speed changes. Therefore, this method and theory have reference and application value.

Key words: wind power generation; fuzzy control; maximum power; DFIG

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

张吴飞,王双园,李帅帅,等. 双馈风机系统最大功率控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2022, 39(5): 42—49.

ZHANG Wu-fei, WANG Shuang-yuan, LI Shuai-shuai, et al. Research on maximum power control of doubly-fed wind turbine system[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022, 39(5):42—49.