

双馈风力发电机功率控制方式的改进方案及验证

金 叶, 张 岩, 金雨晴, 冯际轩

(河北科技大学电气工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要: 为了解决双馈风力发电机变桨电机容易故障失效的工程实践问题, 提出了一种双馈风力发电机功率控制方式的改进方案。基于双馈风力发电机的数学模型, 分析最大功率追踪系统的搭建方法。采用低转速时使用最佳叶尖速比法, 高转速时使用最佳功率控制方案代替常用的最佳叶尖速比法转恒速控制。对两种方案创建 MATLAB 仿真, 分析了最佳叶尖速比法和最佳功率控制方案的优缺点。仿真表明该方案较传统方案更有优势, 可以减少变桨次数, 明显提高变桨电机的工作寿命, 与实际的解决方案相符。

关键词: 双馈风力发电机; 最大功率追踪系统; 最佳叶尖速比法; 最佳功率控制; 解决方案

Improvement scheme and verification of power control mode of doubly-fed wind turbine

JIN Ye, ZHANG Yan, JIN Yuqing, FENG Jixuan

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In order to solve the engineering practice problem that the variable rotor motor of doubly-fed wind turbine is prone to failure, an improved power control scheme of doubly-fed wind turbine was proposed. Based on the mathematical model of doubly-fed wind generator, the method of building maximum power tracking system is analyzed. The optimal tip speed ratio method is used at low speed, and the optimal power control scheme is used instead of the commonly used optimal tip speed ratio method at high speed to control constant speed. MATLAB Simulation is created for the two schemes, and the advantages and disadvantages of the optimal blade tip ratio method and the optimal power control scheme are analyzed. Simulation results show that this scheme has more advantages than common schemes, which can reduce the number of rotor changes and significantly improve the working life of the rotor changes, which is consistent with the actual solution.

Key words: doubly-fed wind turbine; maximum power tracking system; optimum blade tip ratio method; optimal power control; the solution

0 引言

风力发电是我国新能源发电的重要组成部分。近年来, 我国新能源发电行业发展迅速, 于风力发电机组建设完成后运行维护成本较低,

河北省自然科学基金(E2019208443); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021202); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202210081012)

风力发电机组的故障率也较低,投资回报较为稳定,因此风力发电行业深受投资者喜爱,新增建设的风电场也越来越多。

在我国风力发电快速发展前期,2008年左右,我国风机的最大功率追踪系统多采用传统功率控制方案,可将传统控制方案按照风速的逐步升高分为三个阶段:第一阶段为变转速阶段,在运行中保持最佳叶尖速比以获得最大风能转换效率;第二阶段为恒定转速阶段,在运行中保持转速稳定在最大额定转速上,随着风速的提高逐步增大电机转矩;第三阶段为恒定功率阶段,高于额定风速时,通过变桨距系统改变桨叶节距,限制风力机获取能量,保持功率输出稳定^[1]。

以内蒙古某一2009年投运的风场为例,该风场频报变桨电机温度高故障,多次更换电机后故障仍然出现,分析运行数据发现,其机型为四极发电机,同步转速为1 500 r/min,并网运行范围为1 000~2 000 r/min,额定转速为1 800 r/min,在风速高于起动风速3 m/s后,桨叶开始变桨,带动发电机提高转速,此时发电机没有励磁,电磁转矩为零。当发电机转速到达1 000 r/min后,变频器机侧合闸,发电机开始励磁,风机按照传统控制方案第一阶段保持最佳叶尖速比运行,当转速达到1 800 r/min后,风速达到8 m/s,风机结束第一阶段进入第二阶段。此后随着风速升高,发电机转速保持1 800 r/min不变,输出功率逐步上升,在约12 m/s时进入第三阶段^[2]。理论上传统控制方案具有较高的运行效率,但在实际运行中,发电风机在恒定转速运行阶段末端以及接近恒功率运行阶段桨叶频繁大幅度改变。原因是风轮功率与风速的三次方成正比,在风速较高时功率提升速度快,风轮转矩很大,但风机电磁转矩有最大值限制,风轮转矩超过最大电磁转矩导致风轮转速持续上升,引起变桨系统介入桨叶收桨,减小输入功率,此后又迅速开桨,维持风轮转矩和电磁转矩的动态稳定。频繁的开桨与收桨造成变桨轴承的磨损和卡滞,引起风机故障的频发^[3]。

为解决这一问题,对风机使用了优化的控制

策略,在使用最佳叶尖速比法将电机转速升至约1 600 r/min后,切换至最佳功率跟踪控制法,在风速上升时及时调整电磁转矩变化,转速上升速率很慢。当机组达到满载时转速和电磁转矩均不再增加,按照额定转速和额定转矩较为稳定的控制机组功率,按满载功率进行变桨调节。

1 双馈风力发电机基本模型

为制作系统仿真,应先制作风机的数学模型。双馈感应发电机与普通异步发电机在结构上类似,但数学模型上有较大差别,普通异步发电机电磁转矩与转差率的关系为

$$\begin{cases} T_e = \frac{pm}{2\pi f_1} \times \frac{U_s^2 \frac{R_r}{s}}{\left(R_s + \sigma \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + \sigma X_r)^2} \\ \sigma = 1 + \frac{Z_s}{Z_m} \approx 1 + \frac{X_s}{X_m} \end{cases} \quad (1)$$

式中, m 为相数; p 为极对数; f_1 为电网频率; s 为转差率。

分析式(1),在转差率为零时,异步电机处于同步转速,此时电磁转矩为零;转差率为正时,电机转速在同步转速以下,做电动机运行;转差率为负时,电机转速在同步转速以上,做发电机运行。同时漏磁系数 $\sigma > 1$,具体数值根据定子感抗与漏感抗的比值确定。

双馈感应发电机与异步发电机不同,不论转差率为正或负,双馈感应发电机均处于发电机运行状态。例如,当实际转速小于同步转速时,变频器向转子绕组输入一定频率的交流励磁,使定子输出恒频电流给电网;当实际转速为同步转速时,变频器向转子提供直流励磁,定子输出功率;当实际转速超过同步转速时,定子和转子同时输出电能给电网。即无论转速如何变化,定子均处于发电状态,转子频率总是和转差率成正比,即

$$f_2 = sf_1 \quad (2)$$

式中, f_2 为转子频率。

列出双馈感应发电机基本电压、电流方程式为

$$\begin{cases} U_s - E_s = (R_s + jX_{ls})I_s \\ \frac{U_s}{s} - E_r = \left(\frac{R_s}{s} + j\omega_l X_{lr} \right) I_r \\ E_s = jX_m I_m \\ E_s = E_r \\ I_m = I_s + I_r \end{cases} \quad (3)$$

可得双馈感应发电机定转子磁链的计算方程为

$$\psi_s = L_m(I_s + I_r) + L_{ls}I_s = L_s I_s + L_m I_r \quad (4)$$

$$\psi_r = L_m(I_s + I_r) + L_{lr}I_r = L_m I_s + L_r I_r \quad (5)$$

式中, ψ_s 为发电机定子磁链; ψ_r 为发电机转子磁链; L_s 为定子绕组自感, $L_s = L_m + L_{ls}$; L_r 为转子绕组自感, $L_r = L_m + L_{lr}$; L_m 为发电机互感。

由于双馈感应发电机动态特性具有非线性、强耦合和多变量的特点, 在磁链和转矩方程中

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \\ i_{rx} \\ i_{ry} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_l + \frac{\omega_r L_m^2}{\sigma L_s L_r} & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{\omega_r L_m}{\sigma L_s} \\ -\omega_l - \frac{\omega_r L_m^2}{\sigma L_s L_r} & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{\omega_r L_m}{\sigma L_s} & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & -\frac{\omega_r L_m}{\sigma L_r} & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_l - \frac{\omega_r}{\sigma} \\ \frac{\omega_r L_m}{\sigma L_r} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & -\omega_l + \frac{\omega_r}{\sigma} & -\frac{R_s}{\sigma L_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \\ i_{rx} \\ i_{ry} \end{pmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{pmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \\ u_{rx} \\ u_{ry} \end{pmatrix} \quad (7)$$

电动机漏磁系数 σ 为

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (8)$$

式中, ω_l 为定子频率; ω_r 为转子频率; R_s 为定子电阻; R_r 为转子电阻。由式(8)可知, 漏磁系数 $\sigma \leq 1$, 这是双馈感应发电机与普通异步发电机在数学关系上的区别。

电磁转矩方程为

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} n_p (\psi_{sx} i_{sy} - \psi_{sy} i_{sx}) = \frac{3}{2} n_p (\psi_{rx} i_{ry} - \psi_{ry} i_{rx}) = \\ &= \frac{3}{2} n_p L_m (i_{sy} i_{rx} - i_{sx} i_{ry}) \end{aligned} \quad (9)$$

运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (10)$$

式中, T_L 为风轮转矩; J 为转动惯量; n_p 为极对数。

既有三相绕组之间的耦合, 又有定转子电流之间的相互影响。因此, 可以利用坐标变换(派克变换)进行简化, 即

$$T_{3s/2r}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

派克变换的目标是将三相静止坐标系转化为两相同步旋转坐标系的一种变换^[4]。

将式(6)代入式(3)~式(5), 整理后可得同步旋转 xy 坐标系下以电流为状态变量的双馈感应发电机状态方程, 即

由式(7)、式(10)可以制作双馈发电机和传动链的仿真模型, 如图1、图2所示。

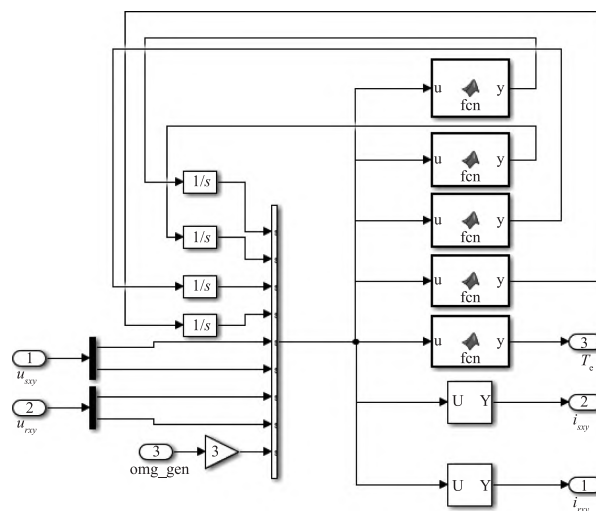


图1 双馈发电机仿真模型

Fig. 1 Simulation model of doubly fed generator

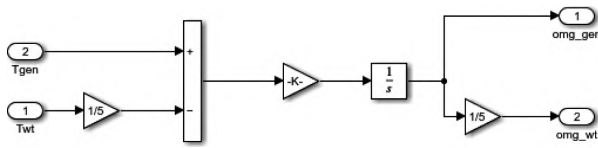


图2 传动链仿真模型

Fig. 2 Drive chain simulation model

2 最佳转速给定法的机侧电流控制技术

双馈风力发电机发电分为两部分：一部分为定子发电，直接与电网相连接；另一部分为转子发电，仅在超同步状态发电，转速未超过同步转速时，转子不仅不发电，还会从电网中吸收电能进行励磁。由式(7)可知，转子电流与定子电流存在某种内在关系，实际上由于定子发电时电压与频率稳定，定子电压 x 轴和 y 轴分量为

$$\begin{cases} u_{sx} = 0 \\ u_{sy} = |u_{sy}| = U_s \end{cases} \quad (11)$$

如忽略定子电阻，则定子电压超前定子磁链 90° ，即与 y 轴保持一致，双馈感应发电机定子磁链定向在同步旋转 xy 坐标系下的 x 轴上，容易获得定子磁链 x 轴和 y 轴分量分别为

$$\begin{cases} \psi_{sx} = |\psi_{sy}| = \psi_s \\ \psi_{sy} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

定子励磁电流为

$$i_{ms} = \frac{\psi_{sx}}{L_m} = \frac{|\psi_{sy}|}{L_m} = \frac{\psi_s}{L_m} \quad (13)$$

为完成最大风能的捕获，实现转子电流转矩分量与励磁分量（即有功分量与无功分量）的解耦控制，如果忽略双馈感应发电机定子电阻的影响，双馈感应发电机在定子磁链定向下的等效电路进一步简化，结合式(4)、式(5)，得到用定转子电流表述的转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{rx} = R_r i_{rx} + L_r \frac{di_{rx}}{dt} + L_m \frac{di_{sx}}{dt} - \omega_2 (L_r i_{ry} + L_m i_{sy}) \\ u_{ry} = R_r i_{ry} + L_r \frac{di_{ry}}{dt} + L_m \frac{di_{sy}}{dt} + \omega_2 (L_r i_{rx} + L_m i_{sx}) \end{cases} \quad (14)$$

式中， ω_2 为双馈感应发电机的转差，即 $\omega_2 = \omega_1 - \omega_r$ 。

结合式(4)、式(5)、式(12)和式(13)，可得定转子电流之间关系式为

$$\begin{cases} i_{sx} = \frac{L_m}{L_s} (i_{ms} - i_{rx}) \\ i_{sy} = -\frac{L_m}{L_s} i_{ry} \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)可得转子电压状态方程为

$$\begin{cases} u_{rx} = R_r i_{rx} + \sigma L_r \frac{di_{rx}}{dt} + \frac{L_m^2}{L_s} \frac{di_{ms}}{dt} - \omega_2 \sigma L_r i_{ry} \\ u_{ry} = R_r i_{ry} + \sigma L_r \frac{di_{ry}}{dt} + \omega_2 \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} + \omega_2 \sigma L_r i_{rx} \end{cases} \quad (16)$$

计算式(16)的扰动补偿量为

$$\begin{cases} \Delta u_{rx} = -\frac{L_m^2}{L_s} \frac{di_{ms}}{dt} + \omega_2 \sigma L_r i_{ry} \\ \Delta u_{ry} = -\omega_2 \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} - \omega_2 \sigma L_r i_{rx} \end{cases} \quad (17)$$

由于稳态时定子励磁电流大小恒定，认为励磁电流的导数项为零，结合式(16)、式(17)得出转子电压 u_{rx} 、 u_{ry} 的完整控制方程为

$$\begin{cases} u_{rx} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{rxref} - i_{rx}) - \Delta u_{rx} \\ u_{ry} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{ryref} - i_{ry}) - \Delta u_{ry} \\ \Delta u_{rx} = \omega_2 \sigma L_r i_{ry} \\ \Delta u_{ry} = -\omega_2 \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} - \omega_2 \sigma L_r i_{rx} \end{cases} \quad (18)$$

式中， i_{rxref} 由无功功率控制； i_{ryref} 由转速给定值和实际测量值的差值通过PI控制器产生；而转速参考值通过最佳叶尖速比 λ_{opt} 确定^[5]。

$$\begin{cases} \Omega_{wt} = \frac{\lambda_{opt} v}{R_{wt}} \\ \omega_{tref} = N \Omega_{wt} \end{cases} \quad (19)$$

式中， N 为齿轮箱增速比。

在以最佳叶尖速比下的转速为控制目标的情况下，根据式(18)设计出最佳转速给定的双馈感应发电机定子磁链定向控制系统原理图，如图3所示。

3 最佳转速的获取

由于风能的特殊性，根据贝茨极限理论风能的捕获效率，即功率系数 C_p 不会超过

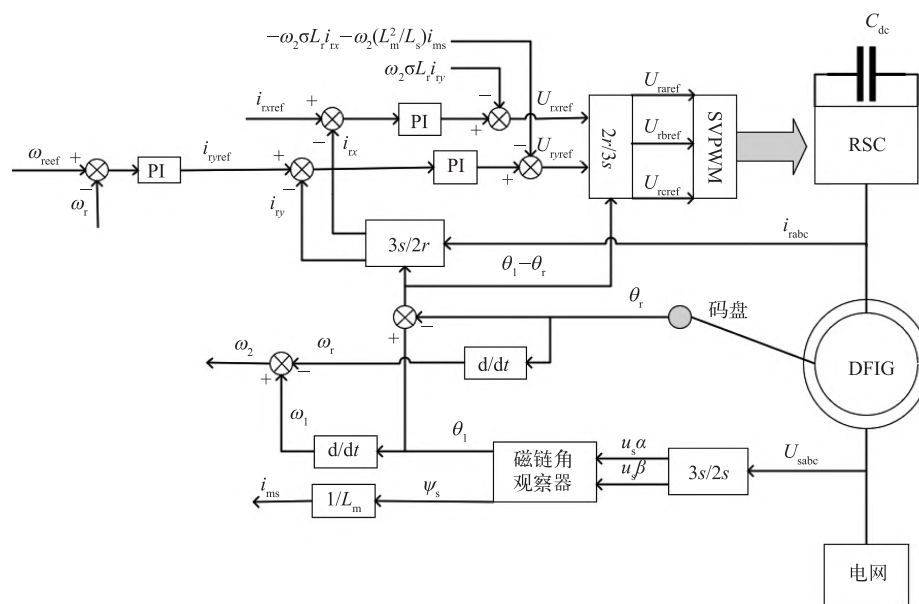


图3 最佳转速给定的定子磁链定向控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of stator flux oriented control system with optimal speed

0.593，在风速一定的情况下，功率系数高，则代表风轮转速处于合适的区间，传递给发电机的能量大，风轮转速为最佳转速。

事实上，功率系数 C_p 不仅是与风速有关的函数，而且是叶尖速比 λ 和桨叶节距角 β 的函数，即

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (20)$$

式中，叶尖速比 λ 为风轮在不同风速下的状态，即风轮叶片的叶尖线速度与风速之比

$$\lambda = \frac{2\pi R_{wt} n_{wt}}{v} = \frac{\Omega_{wt} R_{wt}}{v} \quad (21)$$

由式（20）可知，功率系数 C_p 取最大值时，桨叶节距角为0。对于给定的一个风速信号，总存在一个最优的 λ 值，使得风轮的功率系数最大。

风轮除了功率系数外，还存在一个转矩系数，风轮转矩的大小为功率除以风轮角速度，即

$$T_{wt} = \frac{P_{wt}}{\Omega_{wt}} \quad (22)$$

$$\text{根据 } C_p = \frac{P_d}{P_w} = \frac{P_d}{\frac{1}{2} \rho S v^3} \text{ 以及 } C_T = \frac{T_{wt}}{\frac{1}{2} \rho S v^2 R_{wt}},$$

将式（21）、式（22）代入可以得到风轮功率系数与转矩系数的关系^[6]为

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (23)$$

对式（20）进行测算，测得在 β 为0时， C_p 取得最大值为0.48，此时叶尖速比 λ 约为8.1。此时转矩系数 C_T 不是最大值，因为叶尖速比偏大，造成转矩系数较小，如想取得最大转矩系数，则叶尖速比 λ 约为6.74，对应的功率系数约为0.436。

分析两者之间的差异，在风轮转速为控制目标的前提下，叶尖速比保持一定值，获得最佳功率系数，而在风轮转矩为控制目标的前提下，最大转矩出现在更低的转速下。为保持最大转矩运行，应适当舍弃对最大功率系数的追求。

由式（20）~式（22）可以制作风轮仿真模型，根据有效风速与电机转速的输入，能够计算功率系数、输出转矩与输出功率。

图4风轮仿真模型的机械转矩输出与图1双馈发电机仿真模型的电磁转矩输出结合，经过图2传动链仿真模型的计算，输出最佳转速的参考值 ω_{ref} ^[7]。

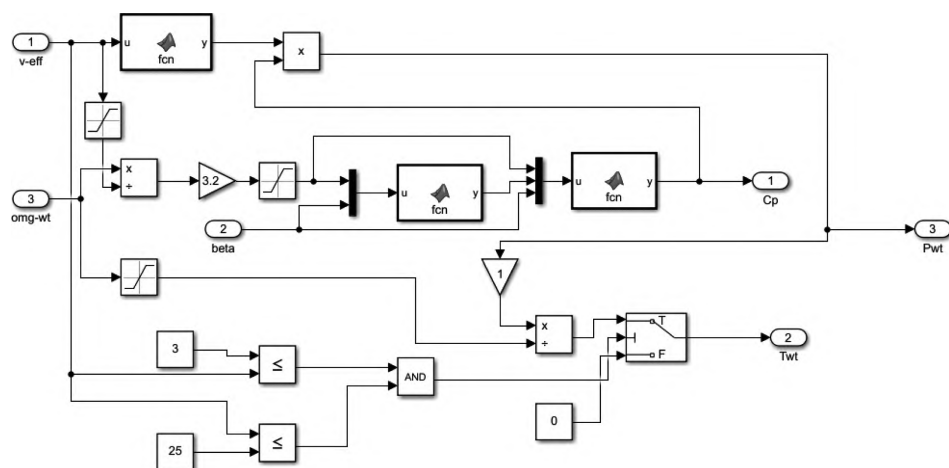


图 4 风轮仿真模型

Fig. 4 Wind turbine simulation model

4 仿真分析

组合图1~图4仿真模型,搭建出最佳转速给定的系统仿真模型,如图5所示。

运行该仿真,图6显示实际输出转速跟随目标转速变化,图7显示功率系数在升至约0.48后保持稳定。

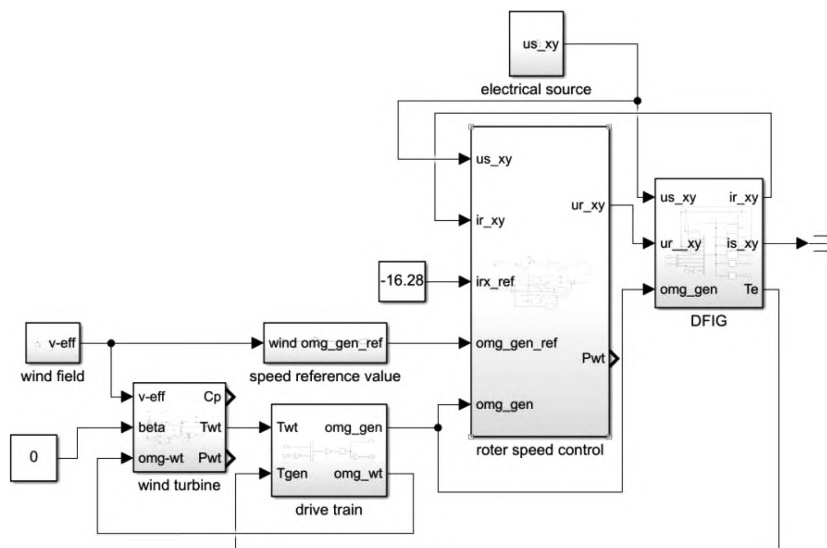


图 5 最佳转速给定的系统仿真模型

Fig. 5 System simulation model with optimal speed setting

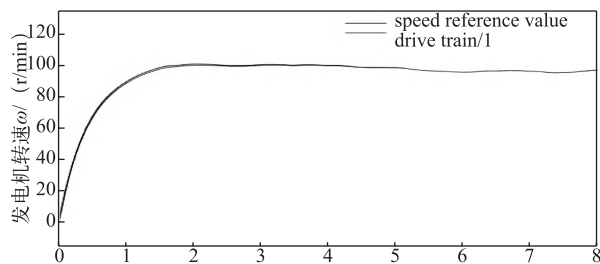


图 6 转速曲线

Fig. 6 Speed curve

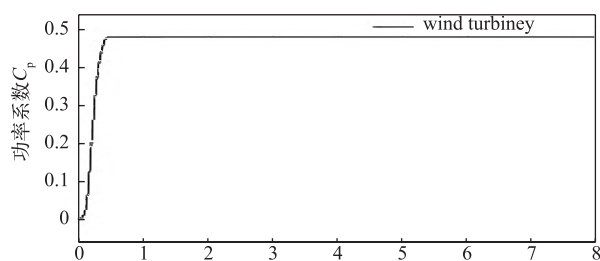


图 7 功率系数曲线

Fig. 7 Power factor curve

图6和图7可以看出最佳叶尖速比法的优点明显,既能保持转速的跟随性,又能保持功率系数的稳定,然而为了达到这一目标,代价是电机转矩不断变化,造成了输出有功功率曲线的抖动,与目标功率具有较大差距,如图8所示。

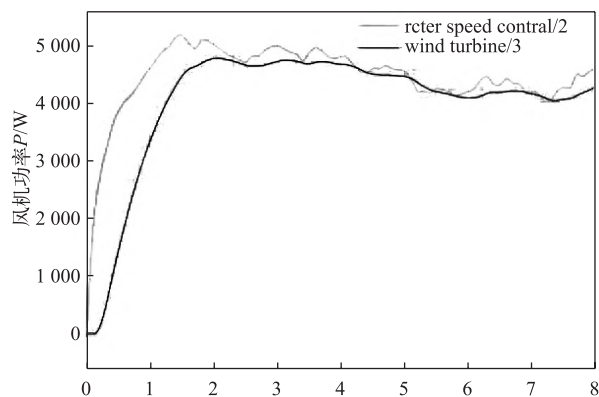


图8 实际功率与目标功率曲线

Fig. 8 Actual power and target power curve

分析图9可以看出,在风速较低时,风能全部传递到电机轴上,电机转矩较大,机侧未启动,认为阻碍转速提升的电磁转矩为零,电机转矩带动电机转动,提高风机转速,在转速升高后电磁转矩开始升高,输出转速逐渐与目标转速重合,并随风速变化一致跟随。同时也验证了电机转矩的不断变化导致输出功率不够稳定这一结论。

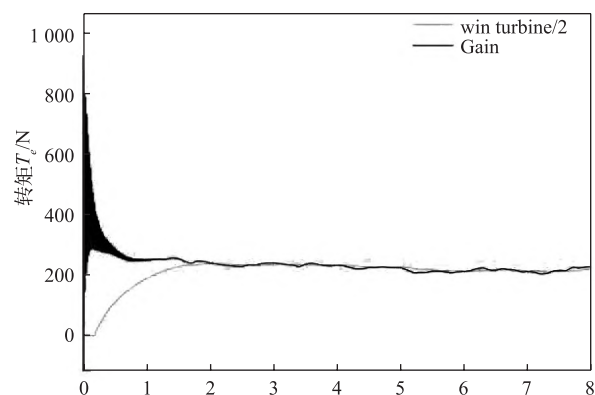


图9 电机转矩与电磁转矩曲线

Fig. 9 Curve of motor torque and electromagnetic torque

最佳功率系数的获得表明了上述控制方法具有捕获最佳风能的能力,即风力发电机组运行在最佳功率系数曲线上,但是具有不能很好地追踪

最佳功率的缺点。为克服这一缺点,使用最佳功率控制策略方案。

5 最佳功率给定法的机侧电流控制技术

网侧变换器和电网之间的有功无功功率交换公式为

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2}(u_{gx}i_{gx} + u_{gy}i_{gy}) = \frac{3}{2}u_g i_{gx} \\ Q_g = \frac{3}{2}(u_{gy}i_{gx} - u_{gx}i_{gy}) = -\frac{3}{2}u_g i_{gy} \end{cases} \quad (24)$$

结合式(11)、式(15)和式(24),定子侧瞬时功率可简化为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{sx}i_{sx} + u_{sy}i_{sy}) = \frac{3}{2}u_s i_{sy} = -\frac{3}{2}u_s \frac{L_m}{L_s} i_{ry} \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{sy}i_{sx} - u_{sx}i_{sy}) = \frac{3}{2}u_s i_{sx} = \frac{3}{2}u_s \frac{L_m}{L_s} (i_{ms} - i_{rx}) \end{cases} \quad (25)$$

由式(25)可知,通过控制转矩分量 i_{ry} 和励磁分量 i_{rx} 的大小,控制电机的有功和无功功率。总结为最大功率给定法同样采用双环控制,其中功率控制作为外环控制,电流控制作为内环控制。在电网正常的条件下,定子电压和定子磁链均保持恒定。按照式(25),定子有功功率和无功功率可分别由转子电流的 x 、 y 轴分量控制。

$$\begin{cases} i_{rxref} = -\left(\frac{L_s}{L_m}i_{sx} - i_{ms}\right) \\ i_{ryref} = \frac{L_s}{L_m}i_{sy} \\ i_{sy} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(P_{sref} - P_s) \\ i_{sx} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(Q_{sref} - Q_s) \end{cases} \quad (26)$$

结合式(18)、式(26)设计出最佳功率给定的双馈感应发电机定子磁链定向控制系统原理图,如图10所示。

同时电机模型以及风轮仿真模型和传动链仿真模型保持不变,搭建最佳功率给定的系统仿真模型,如图11所示。

运行仿真模型如图12、图13所示。可以看出定子功率和有功功率都具有较好的跟随性。

由上图了解到最佳功率给定法追踪最大功率的优点,系统很好地跟随定子功率和有功功率的目标曲线并保持稳定。另外一个优点是由于目标功率较为平衡,导致输出转矩保持在一个较为稳定的状态,也影响输出转速,使转速保持在一个稳定状态,几乎没有变化。

在转速稳定的情况下,功率的波动只影响转子 y 方向电流 i_{ry} 的变化,使转子电压 u_{ry} 轻微波动,这种波动引起的电磁转矩的变化太小,不会引起转速的变化。这一方面是一个优点,但是由于转速不跟随最佳叶尖速比时的目标转速变化,导致系统最终输出的功率系数较低,只能达到约40%,这是最佳功率给定系统的一个缺点。

两个方案的转子电压 y 方向电流不一致,最佳功率控制策略的转子 y 方向电压不为零,而是保持在一个稳定值。实际上,这一值是式(18)中的扰动补偿量 Δu_{ry} ,由于转速保持稳定,扰动补偿量也维持定值,体现在转子电压 u_{ry} 中。

两套方案中定子无功功率都能保持0不变,双馈感应发电机有功功率和无功功率在矢量控制技术的控制下实现解耦。在整个运行期间,尽管有功功率在不断变化,但无功功率保持不变。

比较传统方案和改进方案,在传统方案的恒转速阶段,目标转速保持1 800 r/min不变,实际转速与目标转速的差值经PI控制作为目标电磁转矩输出,风机跟随目标转矩调整转子电流,但由于目标转速与超速转速2 000 r/min差值过小,为避免频繁报出超速故障,因此设置PI控制参数大,在风速增速快时,目标电磁转矩过大超过了风机能够提供的最大电磁转矩,导致变桨控制系统介入引起了风机桨叶经常性回桨,减少能量的输入。

使用最佳功率控制的改进方案,在同等风速情况下,电机的转速更低,裕度更大,即使经历阵风也能不超过最大转速,同时转子电流的目标值不经转速差控制,而是受风机目标功率的直接控制,响应速度更快,输出功率更稳定,因而电磁转矩平稳,更能抵御阵风,而不需要变桨系统的介入,该改进方案在延长变桨轴承寿命方面更

有理论上的优越性。

假设某一风机变桨轴承已出现卡滞,分析变桨系统介入后的情况:在风速缓慢变化的高风速情况下,变桨系统在开桨收桨时通常为慢速变桨,速度明显低于 $5^\circ/\text{s}$,此时变桨轴承阻力低,变桨电机运行时温升不明显,故障不报出:在遭遇阵风或快速变化的高风速情况下,风机执行甩负荷顺桨,此时顺桨速度达到 $5^\circ/\text{s}$,变桨轴承阻力增大,变桨电机运行时温度快速升高,风机报出“变桨电机温度高”停机;极端阵风情况下,风机报出“风机超速”停机,此时顺桨速度达到 $8^\circ/\text{s}^{[6]}$,变桨电机运行温度仍快速升高。使用最佳功率控制的改进方案并配合调整超速参数设置,可在额定风速前保持叶片桨叶角度锁定,使变桨系统长期处于休眠状态,避免频繁报出故障,提高风机可利用率。

6 结束语

上述章节的理论与仿真验证了最佳转速给定法和最佳功率给定法各自的优缺点,在低速阶段,采用最佳转速给定法能够快速追踪最佳转速,使风机尽快达到最大功率系数;在高风速阶段,采用最佳功率给定法可以维持风机转速稳定,风机功率跟随风速平稳变化,风机转速保持稳定,避免了大风时期叶片频繁变桨的问题。由于变桨轴承更换困难(需要单独招标),方案在现有条件下延长了变桨轴承和变桨电机的使用寿命,而无须更换变桨轴承,是一种较传统方案更有优势的最大功率跟踪系统解决方案,值得在未来采用新型控制策略的风电场中推广使用。

最佳转速控制策略存在输出功率不稳定和功率系数低的缺点。探究其原因发现,风机转矩和输出功率受转子 y 方向电流 i_{ry} 控制,而 i_{ry} 受风机转速和定子有功功率的共同影响。在低风速阶段采用最佳转速给定法控制策略,让风机快速追踪最佳转速,高效吸收风能,此阶段应重点关注风机转速对控制系统的影响。在高风速阶段采用最佳功率给定法,在稳定风机转速的前提下快速跟踪定子功率,为避免桨叶频繁变桨,此阶段应重点

关注定子有功功率的变化对控制系统的影响。在不同阶段选取不同的局部最优解才能得到整体最优解。

本控制方法未能设计两种控制方案的切换策略，且由于本文重点关注整体控制策略的实现，未能表现风机变频器机侧与网侧各自的控制目标与实现，这些都是未来进一步的改进与研究方向。

参考文献

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组检测与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [2] 张育建, 王明军. 风电机组变桨电机温度高故障分析 [J]. 风能, 2021(8): 76-78.
- [3] 邵勤丰, 王明军. 风电机组超速问题案例分析[J].

风能, 2019(8): 64-68.

- [4] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [5] 凌禹. 双馈风力发电系统的建模、仿真与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [6] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.
- [7] 凌禹. 风力发电最大风能追踪研究及其系统仿真 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.

作者简介

金叶（1994—），男，硕士研究生，研究方向为双馈风力发电机控制策略。

（收稿日期：2022-08-12）