

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220375

面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究

谈竹奎, 文贤馗, 杨涛, 曾鹏, 胡明辉

(贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 双馈感应风力发电机是一种具有三相励磁绕组结构的异步电机, 其运行具有变速恒频的特点, 因而在新型电力系统中的风力发电领域有着重要的应用价值。利用 Park 变换, 构建了 dq 坐标系下的数学模型, 实现了电机的有功、无功功率的解耦控制。并且利用电压定向矢量控制的方法, 实现双馈感应风力发电机的变速恒频运行。之后搭建一套完整的双馈感应风力发电机及其控制系统的模型, 并对所提控制策略的效果进行了验证。仿真结果表明, 该控制策略对功率指令值具有良好的跟踪效果, 并可以在变化的风速下实现稳定的变速恒频运行。

关键词: 新型电力系统; 双馈感应风力发电机; 坐标变换; 变速恒频; 功率解耦

A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems

TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, ZENG Peng, HU Minghui

(Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: The doubly-fed induction wind turbine is an asynchronous motor with a three-phase excitation winding structure, and its operation has the characteristics of variable speed and constant frequency, so it has important application value in the field of wind power generation in new power systems. In this paper, a mathematical model under the dq coordinate system is constructed using the Park transformation, and the active and reactive power of the motor are controlled separately, and the voltage-oriented vector control method is used to realize the variable-speed and constant-frequency operation of the doubly-fed induction wind turbine. After that, a complete model of the doubly-fed induction wind turbine and its control system is built, and the effect of the proposed control strategy is verified. The simulation results show that the control strategy has a good tracking effect on the power command value, and can achieve stable variable-speed and constant-frequency operation with changing wind speeds.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GZKJXM20210373).

Key words: new power system; doubly-fed induction generator; coordinate transformation; variable speed constant frequency; power decoupling

0 引言

新型电力系统以实现碳达峰碳中和为前提, 确保能源电力安全满足经济社会需求, 最大化消纳新能源^[1-2]。而新型电力系统中新能源占比高, 尤其风力发电、太阳能发电等新型能源并入比例较大^[3]。但是风能是一种随机性强、爆发性高、不稳定的能源, 因此在并网过程中风力发电输出功率易存在波动的现象, 造成电网功率与负荷不匹配, 引发停电事故^[4-5]。此外, 由于新型电力系统中具有大量的

电力电子器件, 因此对于电网的频率振荡较为敏感, 这就对风力发电机的输出频率提出了更高的要求^[6]。基于此, 要保证风力发电在并网过程中, 其在变风速条件下输出功率与输出频率控制在很小误差范围内, 减少并网过程对现有电网的影响, 提高新型电力系统的稳定性^[7]。而目前在风力发电技术中, 最主要的一类为变速恒频技术。变速恒频技术中的双馈感应发电系统定子部分与电网连接, 转子通过背靠背的交直交变换器与电网连接^[8-9], 实现柔性连接, 相较于恒速恒频技术, 其并网操作更加简单。并且其变流器要求低, 体积、成本大大缩小, 可以灵活调节发电机输出功率, 使得风能利用效率最大化, 引起了研究人员的广泛关注^[10-11]。而对于双馈

基金项目: 南方电网有限责任公司科技项目资助 (GZKJXM 20210373)

感应电机(DFIG)的控制, 研究人员主要针对矢量控制展开相关研究。文献[12]通过对定子电压的定向以及前馈补偿控制, 同时基于瞬时功率的转子开环控制, 实现网侧变换器直流环节电压、电流双闭环控制, 并实现微水电有功和无功功率的解耦及单位功率因数并网控制。文献[13]对双馈感应电机的并网运行进行了研究, 描述了双馈感应电机与输电网络的互联模型, 对电压波动下 DFIG 的控制策略、换流站控制策略进行了分析与仿真。文献[14]在传统矢量控制策略的基础上, 引入虚拟惯量对控制方案进行了改进与分析, 给出了具有可行性的控制方案。除此之外, 研究人员还针对电网三相不平衡条件下的双馈感应电机出力特性开展了研究。文献[15]研究了不平衡电网电压下双馈电机的完整动态模型。虽然领域内学者开展了大量的研究, 但是目前仍存在功率变化时发电机产生的电能无法完全送出; 定转子电流出现直流和二倍频分量, 对电网造成谐波污染; 风速变化时, 感应电机输出功率波动等一系列问题。因此, 本文利用坐标变换, 对双馈感应电机的数学模型进行简化, 基于矢量控制的思路设计了双馈感应电机的控制方案, 实现感应电机的变速恒频运行与功率解耦控制, 并通过仿真软件对其进行了验证。

1 双馈感应电机数学模型建立

双馈感应电机作为风力发电的主要组成部分, 其机械结构为: 转子在机械上与风力涡轮机的传动机构相连接, 定子与电网相连^[16]。当向转子绕组通入一定频率的电流时, 形成的磁场相对于定子绕组旋转, 从而定子绕组中产生感应电动势。其中, 转子磁场转速与转子旋转的电角速度之和, 与定子绕组电流产生的磁场转速保持一致。双馈感应电机的定子与电网直接相连, 而转子通过一组整流电路与电网相连接, 从而实现转子一侧的功率双向流动控制与励磁控制^[17]。由于双馈感应电机的数学模型变量多且十分复杂, 对它精确建模十分困难。为了使模型具有较高的简洁性, 同时又能较好地反映其电磁关系与特点, 这里做出以下假设: 1) 定转子绕组中的电阻为恒定值; 2) 磁路不存在饱和现象, 忽略磁滞与铁耗; 3) 三相绕组间为星型连接结构, 且空间分布完全对称, 合成磁动势在气隙方向上呈正弦规律分布; 4) 忽略空间谐波影响^[18]。将电机理想化, 定、转子各三相绕组的电磁关系如图 1 所示。

基于电磁关系, 可以将电机的瞬时电气量表示为以下两组微分方程。

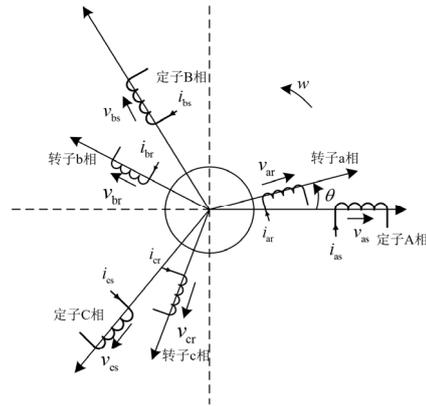


图 1 定、转子三相绕组电磁关系

Fig. 1 Electromagnetic relationship between stator and rotor three-phase windings

$$\begin{cases} v_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + \frac{d\psi_{as}(t)}{dt} \\ v_{bs}(t) = R_s i_{bs}(t) + \frac{d\psi_{bs}(t)}{dt} \\ v_{cs}(t) = R_s i_{cs}(t) + \frac{d\psi_{cs}(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_{ar}(t) = R_r i_{ar}(t) + \frac{d\psi_{ar}(t)}{dt} \\ v_{br}(t) = R_r i_{br}(t) + \frac{d\psi_{br}(t)}{dt} \\ v_{cr}(t) = R_r i_{cr}(t) + \frac{d\psi_{cr}(t)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: s 和 r 分别代表定子侧与转子侧; v_{as} 、 v_{bs} 、 v_{cs} 与 v_{ar} 、 v_{br} 、 v_{cr} 分别表示定、转子的三相绕组电压; R_s 、 R_r 分别为定、转子等效电阻; i_{as} 、 i_{bs} 、 i_{cs} 与 i_{ar} 、 i_{br} 、 i_{cr} 分别表示定、转子三相电流; ψ_{as} 、 ψ_{bs} 、 ψ_{cs} 与 ψ_{ar} 、 ψ_{br} 、 ψ_{cr} 分别表示定、转子三相电路中的磁链。

这些微分方程较为复杂, 不利于对电机行为进行分析与控制, 因此需要引入坐标变换以对其进行简化。静止两相-旋转正交变换(Park 变换)可以将三相静止坐标系下的电气量变换到正交旋转的 dq 坐标系下, 从而简化异步电机的分析与控制^[19]。恒幅值 Park 变换公式如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\frac{1}{2}\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta & -\frac{1}{2}\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta \\ -\sin\theta & \frac{1}{2}\sin\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta & \frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 为转换前三相电流; i_d 、 i_q 为转换后 dq 轴电流; θ 为定转子相位差。将 Park 变换应用至前述构建的数学模型中, 可以得到 dq 坐标系下的

电机模型为

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \psi_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} - \omega_r \psi_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_{ds} 、 v_{qs} 、 v_{dr} 、 v_{qr} 分别是定子与转子电压 d 轴与 q 轴上的分量; R_s 、 R_r 分别为定、转子的等效电阻; i_{ds} 、 i_{qs} 、 i_{dr} 、 i_{qr} 分别是定子与转子电流 d 轴与 q 轴分量; ω_s 为同步角速度; ω_r 为 dq 坐标系相对于转子的角速度, $\omega_r = \omega_s - \omega_m = \omega_s - p\Omega_m$, 其中 ω_m 为转子机械转速, p 为极对数, Ω_m 为转子机械转速; ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 、 ψ_{dr} 、 ψ_{qr} 分别是定子与转子磁链的 d 轴与 q 轴分量。

2 双馈感应发电机矢量控制策略

假设双馈感应风力发电机并网运行时, 所连接电网无穷大且电压具有固定的幅值与频率。在向电网供电时, 需要维持输出功率的稳定, 避免有功功率与无功功率的大幅波动。通过矢量控制策略, 控制功率稳定的问题就转换成了对于转子 dq 轴电流分量的控制, 实现转子电流对于指令值的连续稳定跟踪^[20]。此外控制过程中需要将一些关键的电气量进行反馈, 以获得实际电流或电压与其对应指令值之间的误差, 再通过控制器实现其对于指令值的跟踪。对于双馈感应风力发电机的矢量控制系统主要包括以下几个部分: 转子 dq 轴电流指令值计算(含功率环)、电流环(以获得转子 dq 轴电压指令值)、变换角计算。整个矢量控制系统的原理框图如图 2 所示。

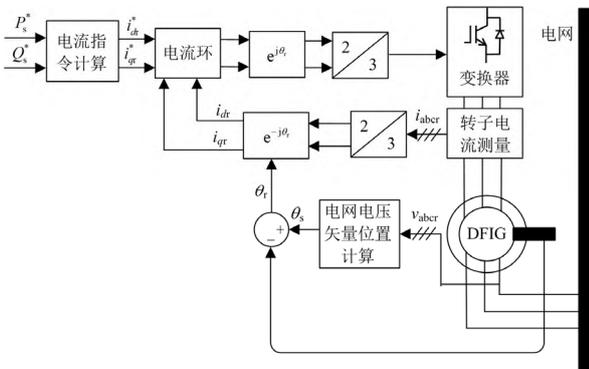


图 2 矢量控制系统原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of the vector control system

2.1 电流指令值计算

将电网电压空间矢量定向在 q 轴, 再顺时针旋转 90° 得到 d 轴。在忽略定子电阻的条件下, 此时定子磁链空间矢量与 d 轴同向。电流与磁链之间的关系^[21]可以表示为

$$\begin{cases} \psi_s = i_{ds} L_s + i_{dr} L_m \\ 0 = i_{qs} L_s + i_{qr} L_m \end{cases} \quad (6)$$

式中, L_s 、 L_m 为等效电感。在稳态条件下, 定子磁链 ψ_s 和电网电压 V_g 之间成正比关系, 因此, 若忽略定子电阻, 则有

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = V_g \approx \omega_s \psi_s \end{cases} \quad (7)$$

由于 $v_{ds} = 0$, 那么定子的有功及无功功率可以表示为

$$\begin{cases} P_s = 1.5 v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = 1.5 v_{qs} i_{ds} \end{cases} \quad (8)$$

由定转子电流间关系可得

$$\begin{cases} P_s = -1.5 V_g \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = 1.5 V_g \left(\frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \right) = 1.5 V_g \left(\frac{V_g}{\omega_s L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \right) \end{cases} \quad (9)$$

在当前的定向策略下, 电机定子的有功和无功功率间是分离的, 分别由转子电流的 dq 轴分量控制。需要注意的是, 上述关系仍不是完全准确的。这不仅是因为在式(9)的推导过程中忽略了电机的定子电阻, 而且电机其他参数(譬如匝数比、定转子电感)的不精确也使得控制过程中出现误差^[22]。因此, 可以增加两个功率外环来消除由此产生的误差。这两个环路分别通过控制转子的 dq 轴电流来调节有功和无功功率, 此部分仿真模型结构如图 3 所示, 其中, PID(s)模块为比例-积分-微分调节器。

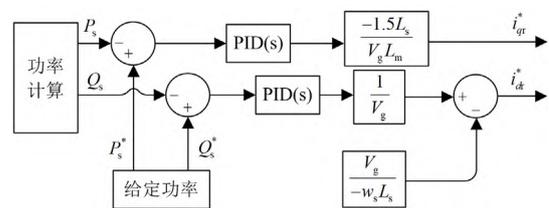


图 3 带有功率外环的电流指令值计算

Fig. 3 Calculation of current command value with power outer loop

2.2 电流控制环计算

转子磁链与电流之间有

$$\begin{cases} \psi_{dr} = (L_r - \frac{L_m^2}{L_s})i_{dr} + \frac{L_m}{L_s}\psi_{ds} \\ \psi_{qr} = (L_r - \frac{L_m^2}{L_s})i_{qr} \end{cases} \quad (10)$$

式中，第一项磁链是与转子电流直接相关的，磁链与电流的比值可以定义为一个比例系数 σ ，称为漏电感系数，即

$$(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) = \sigma L_r \quad (11)$$

将式(10)、式(11)代入式(5)，可得

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} - \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \omega_r \psi_{ds} \end{cases} \quad (12)$$

在双馈感应电机并网运行时，正常情况下电网电压是恒定的，因此磁链 ψ_{ds} 的导数为零，即第一个等式的最后一项可以忽略。在构建控制系统时， $\omega_r \psi_{ds} L_m / L_s$ 是一个扰动项，这是因为它仅取决于定子磁链，使得它与控制环本身无关，仅是一个外部变量。由于稳态下磁链恒定，故此项是一个常数项，可以通过控制器补偿。而两式中的 $\omega_r \sigma L_r i_{qr}$ 项，产生的原因是坐标系与转子旋转不同步，在稳态时其不影响控制环功能，但通常需要对其进行计算和补偿，以改进在暂态过程中的控制效果。电流控制环计算的仿真模型结构如图 4 所示。

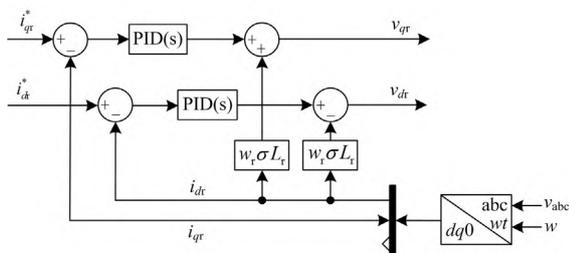


图 4 带有交叉项前馈补偿的电流控制环
Fig. 4 Current control loop with cross term feedforward compensation

2.3 电流控制环计算

对于定转子电压矢量位置的计算有很多解决方案。最常用的方案是利用锁相环(PLL)得到定子电压矢量的位置^[23]，以确定 dq 坐标轴系的位置。而转子的位置则通过安装在转子上的编码器来确定，进而得到转子相对于 dq 同步旋转坐标系的变换角 θ_r 。这里提出了一种较为简单的转子位置计算方法。首先测量定子三相电压的瞬时值，获得三相静止坐标系下，空间中三个轴上的电压分量。然后，将三相静止坐标系中的空间矢量通过 Clark 变换，变换到

两相正交静止坐标系下，再利用极坐标变换，就可以得到定子电压空间矢量的幅值与定子位置角 θ_s 。由于 Simulink 中所使用的 Park 变换，在 $\omega t = 0$ 的时刻，默认 dq 同步旋转坐标系 q 轴与三相静止坐标系 A 轴重合，因此这个模块中所使用的位置角与前文所得到的定子位置角 θ_s 之间相差 90° 。这一部分的仿真控制结构如图 5 所示。

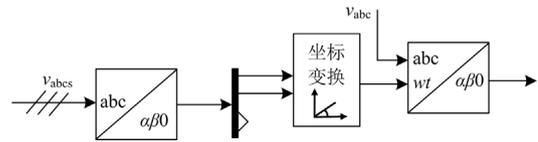


图 5 定子电压变换角的计算
Fig. 5 Calculation of stator voltage transformation angle

而变换角 θ_r 就需要利用 θ_s 与转子位置角 θ_m 相减得到，即

$$\theta_r = \theta_s - \theta_m \quad (13)$$

式中： θ_r 为变换角； θ_s 为定子变换角； θ_m 为转子的位置角。由于电机具有多套绕组，在编码器输出转子位置后，还应当与电机的极对数 p 相乘，所得到的才是 θ_m 。在 Simulink 中使用时，应对 θ_r 补偿一个 90° 的角度差。通过以上的分析，将控制系统整合，得到双馈感应电机仿真模型如图 6，为简洁地表达模型，对其中部分运算单元做了简化。

3 双馈感应风力发电仿真实验结果分析

本文搭建了 2 MW 的双馈感应风力发电机的仿真模型，双馈感应电机的变速运行有 3 个区间，即亚同步、同步与超同步。由于电网工作频率为 50 Hz 且极对数为 2，同步速度为 300π rad/min。根据电动机惯例，功率为负值时电机工作状态为发电机，反之则为电动机。为了观察在不同工作情况下双馈感应电机各电气量的变化，并使发电机的工作情况尽可能贴近工程实际，本文对于几个典型的运行状态进行了单独的模拟。

3.1 功率变化过程的仿真结果分析

在实际的风力发电并网过程中，由于风能的不稳定性与电网的需求变化，对于双馈感应风力发电系统的控制应能够实现对于功率实际需求的跟踪，因此对功率指令值变化的情况进行模拟。当电机工作在 0.9 倍同步转速的亚同步转速下，以发电机状态向外输出 2 MW 有功功率，吸收 0.1 Mvar 无功功率；在第 1 s 时有功功率突变为 1.7 MW，在第 2 s 时无功功率突变为 0.3 Mvar。仿真数据如图 7 所示。

通过观察图 7(a)可以发现，在有功和无功发生突变的时刻，定子侧的实际功率在对应时刻发生突变，并且很快达到有功与无功功率的给定值；由图

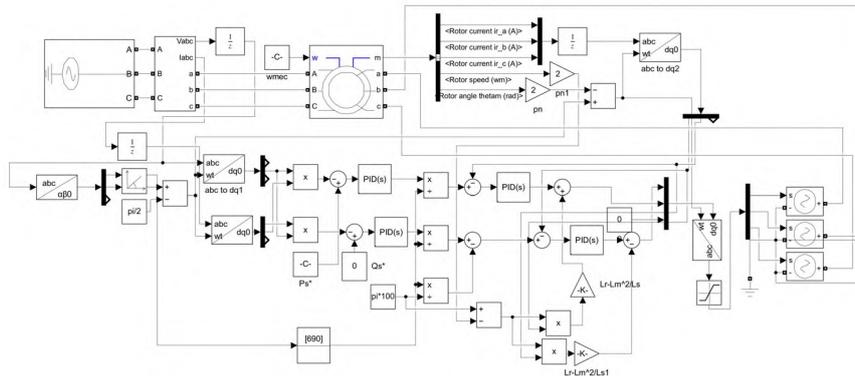


图 6 双馈感应风力发电机仿真模型图

Fig. 6 Simulation model diagram of doubly-fed induction wind turbine

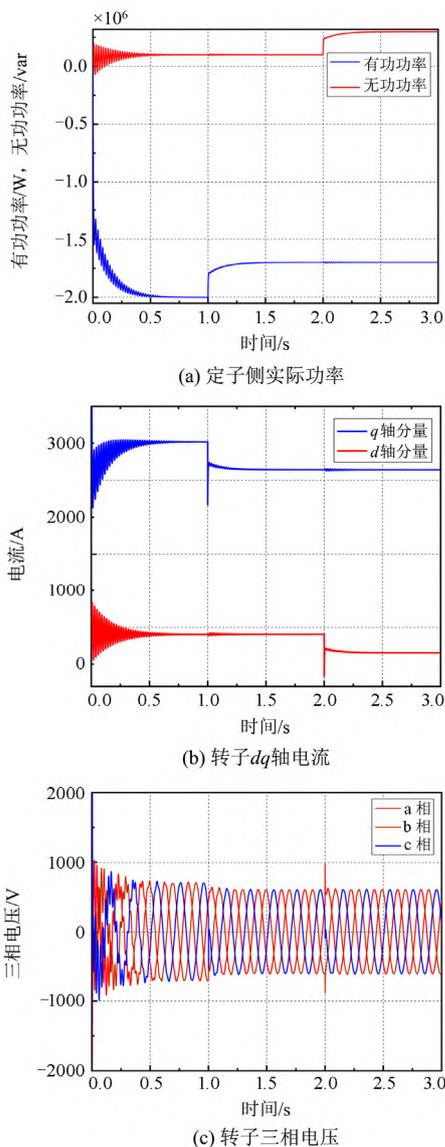


图 7 功率变换下的双馈感应风力发电系统

Fig. 7 Doubly-fed induction wind power generation system under power conversion

7(b)可以看出, 转子 q 轴电流与转子 d 轴电流分别在对应的时刻发生突变, 且其中一个分量变化时, 另一分量几乎没有影响, 仅在 PI 控制器作用下发生了微小的振荡。因此可以认为, 有功功率与无功功率的控制实现了解耦, 其分别由转子的 q 轴和 d 轴电流分量单独控制, 与前文的理论分析一致。

3.2 功率变化过程的仿真结果分析

风力发电系统实际运行时, 必然会遇到风速变化的情况, 为了验证双馈感应风力发电系统在风速变化情况下均可以稳定运行, 进行变风速模拟仿真。为模拟不同时间段风速变化, 设置双馈感应发电机在 1~2.5 s 内以正弦规律由 0.7 倍转速增加为 1.2 倍转速, 而后在 2.5~4 s 内以正弦规律降为 0.7 倍同步转速, 转速变化曲线如图 8 所示。

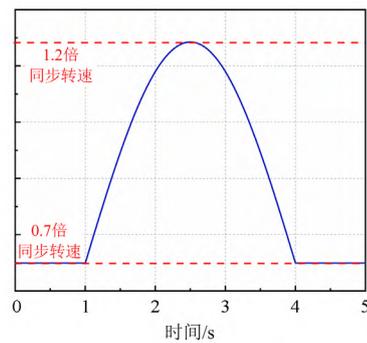


图 8 双馈感应风力发电机转速变化

Fig. 8 Rotation speed change of double-fed induction wind turbine

在此条件下, 双馈感应风力发电系统输出有功功率为 2 MW, 吸收无功功率为 0.1 Mvar, 利用模型仿真模拟, 定子侧功率与转子三相电压数据如图 9 所示。

由图 9(a)可知, 即使风速发生变化, 双馈感应电机的输出功率始终保持在目标值, 实现了变速下

的功率控制。而随着风速的变化，电机转速也随之产生变化，与此同时转子绕组端电压的频率和幅值也在不断调节，以维持功率恒定。如图 9(b)所示，在双馈感应电机由亚同步状态过渡到超同步状态的过程中，转子三相电压的相序也发生了改变。

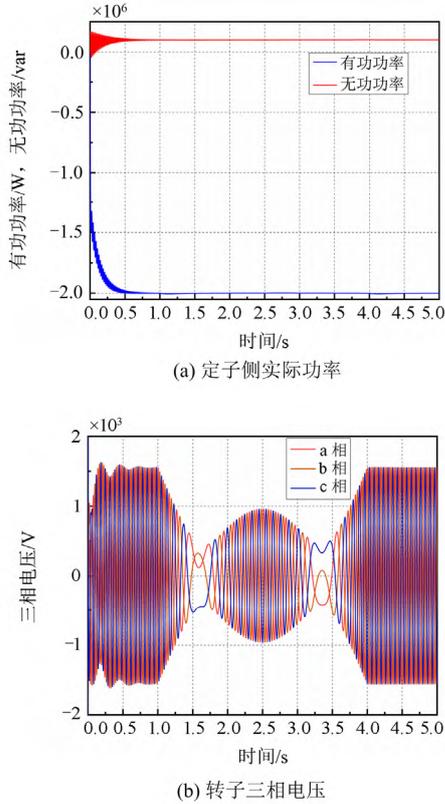


图 9 变风速下的双馈感应风力发电机模拟仿真结果
Fig. 9 Simulation results of doubly-fed induction wind turbines under variable wind speed

4 结论

本文对于空间矢量的表达以及坐标变换的原理进行研究，并利用空间矢量表达与坐标变换，简化了双馈感应电机的数学模型，为进一步建立双馈电机的控制系统提供了数学基础。之后通过定向电网电压矢量建立同步旋转坐标系，实现了感应电机的矢量控制，以及感应电机有功与无功功率间的解耦，使其可以分别跟踪指令功率。并且对于电流指令值计算、变换角计算等进行分析。最后建立仿真模型对控制方案进行验证。结果表明：通过坐标能够将双馈感应电机进行有效控制，并且在外部因素干扰(如功率与风速波动等)情况下保证双馈感应风力发电机的正常工作。本文虽对双馈感应风力发电机进行恒速恒频与功率解耦控制，但是本文是基于理想条件提出的感应电机模型，并进行控制策略研究，

与实际系统存在偏差，矢量控制与工程实际的结合值得后续进一步探究。

参考文献

[1] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.

[2] 文劲宇, 周博, 魏利岫, 等. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen, et al. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.

[3] 周鹏程, 叶嘉雯. 火力发电与新能源发电协同发展模型研究[J]. 山东电力技术, 2020, 47(9): 14-19.
ZHOU Pengcheng, YE Jiawen. Research on coordinated development model of thermal power and new energy generation[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(9): 14-19.

[4] 孙志辉, 郝万君, 曹松青, 等. 基于自适应广义滑模观测器的风力发电系统故障重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 123-130.
SUN Zhihui, HAO Wanjun, CAO Songqing, et al. Fault reconstruction of a wind power system based on an adaptive generalized sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 123-130.

[5] 王玥娇, 张兴友, 郭俊山. 储能技术在高比例可再生能源电力系统中的应用[J]. 山东电力技术, 2021, 48(7): 19-25.
WANG Yuejiao, ZHANG Xingyou, GUO Junshan. Review on the application of energy storage technology in power system with high proportion of renewable energy[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(7): 19-25.

[6] 刘依晗, 王宇飞. 新型电力系统中跨域连锁故障的演化机理与主动防御探索[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 62-72.
LIU Yihan, WANG Yufei. Exploring the evolution mechanism and active defense of cross-domain cascading failures in new type power system[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 62-72.

[7] 赵瑞峰, 郭文鑫, 王彬, 等. 基于群灰狼优化算法的双馈感应电机最优控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 150-158.
ZHAO Ruifeng, GUO Wenxin, WANG Bin, et al. Gathered grey wolf optimizer based optimal control of doubly-fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 150-158.

- [8] 黄杰杰, 李生虎, 孙婷婷, 等. 基于改进动态潮流的DFIG风电系统层级频率模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 68-75.
HUANG Jiejie, LI Shenghu, SUN Tingting, et al. Hierarchical frequency control for a power system with DFIG based on frequency prediction with improved dynamic power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 68-75.
- [9] 刘耀芮, 贾祺, 严干贵, 等. 基于惯量响应的双馈风电机组动态协调机理研究[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 142-151.
LIU Zhaorui, JIA Qi, YAN Gangui, et al. Research on dynamic coordination mechanism of DFIGs based on inertia response[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 142-151.
- [10] WU C, NIAN H, PANG B, et al. Adaptive repetitive control of DFIG-DC system considering stator frequency variation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3302-3312.
- [11] 杨蕾, 王智超, 周鑫, 等. 大规模双馈风电机组并网频率稳定控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 186-194.
YANG Lei, WANG Zhichao, ZHOU Xin, et al. Frequency stability control strategy for large-scale grid connections with DFIG units[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 186-194.
- [12] 叶阳建, 肖蕙蕙, 古亮, 等. 基于双馈发电机的并网型微水电交流励磁控制策略[J]. 分布式能源, 2017, 2(2): 62-67.
YE Yangjian, XIAO Huihui, GU Liang, et al. AC excitation control strategy for grid-connected micro hydropower based on doubly-fed generator[J]. Distributed Energy, 2017, 2(2): 62-67.
- [13] 郑景文, 郭一兵, 陶骞, 等. 基于柔性直流输电系统的双馈风机并网控制研究[J]. 电气传动, 2018, 48(3): 41-46.
ZHENG Jingwen, GUO Yibing, TAO Qian, et al. Research on the control of double-fed induction generator connected with flexible DC transmission[J]. Electric Drive, 2018, 48(3): 41-46.
- [14] 赵勇. 双馈风力发电机的虚拟惯量控制及稳定性分析[J]. 可再生能源, 2018, 36(10): 1523-1528.
ZHAO Yong. Virtual synchronous generator control and stability analysis of doubly fed wind generator[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(10): 1523-1528.
- [15] SUN L, ZHAO X. Impacts of phase-locked loop and reactive power control on inertia provision by DFIG wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(1): 109-119.
- [16] 孙军, 蒋天龙, 王仰铭, 等. 不平衡电网下双馈感应发电机的虚拟同步机控制优化策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 135-144.
SUN Jun, JIANG Tianlong, WANG Yangming, et al. Optimization strategy of virtual synchronous generator control for doubly-fed induction generator in unbalanced power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 135-144.
- [17] TANG H, DAI H, DU Y. Bearing fault detection for doubly fed induction generator based on stator current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 5267-5276.
- [18] AHMAD H, KHALID H, AMIN A A, et al. Improved current controlled doubly fed induction generator model with grid integration under sub and super synchronous conditions[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(1): 141-153.
- [19] O'ROURKE C, QASIM M, OVERLIN M, et al. A geometric interpretation of reference frames and transformations: dq0, Clarke and park[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2070-2083.
- [20] 刘平. 双馈感应发电机矢量控制系统研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
LIU Ping. Research on doubly-fed induction generator vector control system[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2015.
- [21] 范小红, 孙士云, 孙德娟, 等. 双馈风机三相短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 38-48.
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, SUN Dejuan, et al. Analysis of three-phase short-circuit current characteristics of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 38-48.
- [22] 林海翔. 交流异步电动机矢量控制系统数学建模分析[J]. 农业技术与装备, 2020(7): 80-84.
LIN Haixiang. Mathematical modeling analysis of AC asynchronous motor vector control system[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2020(7): 80-84.
- [23] 王霄鹤. 双馈风力发电系统友好并网运行控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
WANG Xiaohu. Investigation on grid-friendly control strategy of DFIG wind power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-27

作者简介:

谈竹奎(1975—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为智能电网、配网自动化; E-mail: tanzk@163.com

文贤旭(1972—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源发电、储能技术等; E-mail: 13985410224@139.com

杨涛(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电气设备状态监测等。E-mail: yangtao17@foxmail.com

(编辑 魏小丽)