DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190729

一种复合转子无刷双馈风力发电机直接功率控制研究

苏晓英[1, 2] 朱连成[2] 金 石[1] 张凤阁[1] 孙 丹[3]
（1. 沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870
2. 辽宁科技大学电子与信息工程学院 鞍山 114051 3. 浙江大学电气工程学院 杭州 310027）

摘要 无刷双馈发电机无电刷和集电环，具有免维护而可靠性高、变流器容量小等优点，极有可能竞争目前风电系统中普遍使用的传统有刷双馈感应发电机和永磁同步发电机。针对新型复合转子结构无刷双馈风力发电机功率绕组有功和无功功率的控制需求，按照控制绕组磁链所在扇区，采用查表方式确定控制绕组机侧变流器的电压空间矢量，进而对其最大功率跟踪及单位功率因数等进行有效的直接功率控制。通过对比 8/4 极 25kW 样机测试系统的仿真与实验结果，证明了所提复合转子无刷双馈风力发电机直接功率控制的正确性、可靠性和有效性。

关键词： 无刷双馈发电机 新型复合转子 直接功率控制 最大功率跟踪
中图分类号： TM614; TM315

Research on Direct Power Control for Brushless Doubly-Fed Wind Power Generator with a Novel Hybrid Rotor

Su Xiaoying[1,2] *Zhu Liancheng*[2] *Jin Shi*[1] *Zhang Fengge*[1] *Sun Dan*[1]
（1. School of Electrical Engineering Shenyang University of Technology Shenyang 110870 China
2. School of Electronic and Information Engineering University of Science and Technology Liaoning Anshan 114051 China
3. College of Electrical Engineering Zhejiang University Hangzhou 310027 China）

Abstract Because of no brushes and slip rings, brushless doubly-fed generators (BDFGs) have some advantages of maintenance-free thus higher reliability, smaller partially-rated converter and so on, which make them very possibly as a competitor for the doubly-fed induction generator and permanent magnet synchronous generator commonly used in wind energy conversion systems (WECS). In this paper, the direct power control (DPC) strategy for the BDFG with a novel hybrid rotor is presented, where according to the real and reactive power errors and sector number of the control winding flux vector, the variable-speed constant-frequency (VSCF) maximum power point tracking (MPPT) and unity power factor control (UPFC) can be implemented by applying the proper voltage space vector obtained with the traditional lookup-table on the machine side converter of control winding. Finally, the correctness, reliability and effectiveness of the proposed DPC for the novel BDFG are all be proved by the detailed simulation results and experimental measurements based on Matlab/Simulink and 8/4-25kW prototype laboratory test rig.

Keywords: Brushless doubly-fed generator (BDFG), novel hybrid rotor, direct power control (DPC), maximum power point tracking (MPPT)

国家自然科学基金重点项目（51537007）和辽宁科技大学优秀人才项目（2018RC08）资助。
收稿日期 2019-06-14 改稿日期 2019-07-19

0　引言

风电系统中广泛采用的传统有刷双馈感应发电机（Doubly-Fed Induction Generator，DFIG）和永磁同步发电机（Permanent Magnetic Synchronous Generator，PMSG）分别因其固有的电刷、集电环等引起的可靠性、运维成本及永磁体高温不可逆退磁、稀土资源管制、价格浮动、需全容量变流器等问题，二者均难以满足大型海上风力发电系统日益增长的高可靠性和高性价比等客观需求[1-2]。

无刷双馈电机（Brushless Doubly-Fed Machine/Generator, BDFM/G）是近些年发展起来的一种新型电机[1-6]，因其在设计之初即取消了限制其发展的电刷和集电环，具有免维护和较高的可靠性。同时，基于“转子极数转换器”的双定子磁场调制机理使其仅需不到电机额定容量 30%的变流器，即可通过改变控制绕组励磁电流频率和相序等使之广泛运行在亚同步、同步和超同步等较宽速度变化范围[1-3]。此外，恰因磁阻转子无刷双馈电机漏抗较大，无需另设 Crowbar 等辅助电路即可有效降低该类电机低电压故障穿越电流值，使之比 DFIG 和 PMSG 具有较高的性价比[7-8]，从而使其极有可能竞争 DFIG 和 PMSG，在大型海上风力发电、水力发电及船舶轴带发电系统中具有广阔应用前景。

文献[9]提出了一种采用径向叠片磁障式磁阻转子结构的无刷双馈电机，实验结果高达 96%的电机本体效率获得了国内外业内人士对该类转子结构的特别青睐，然而，文献[10]在对其应用于风电系统的可行性研究中却发现其单边磁拉力不平衡、存在较为严重的振动及噪声问题，从而限制了该类转子无刷双馈电机的进一步推广使用。文献[11-13]提出在径向叠片磁障式磁阻转子中叠加并联型同心式短路笼条的新型复合转子一体式结构，仿真及实验结果有效证实了该复合转子 BDFM 在减小涡流损耗、增强转子磁场调制能力、改善电机效率等方面具有较大优势。该新型转子结构加工制作较为简单、方便，有利于推动无刷双馈电机的产业化。文献[4,12-13]等对新型双定子无刷双馈发电机进行了分析，进一步证实了该新型双定子结构发电机在改善磁场调制能力、提升功率密度等方面均具有较高的优势。

BDFM 的控制策略主要是源于对传统感应电机相关方法的改进。其中，采用磁场定向的矢量控制技术因对电机数学模型的准确性及参数变化较敏感，且需要磁场定向和复杂的坐标旋转变换计算，对处理器的要求较高[14-15]。直接转矩控制（Direct Torque Control，DTC）[16-19]比矢量控制省去了复杂的磁场定向和坐标变换，但其对电机参数变化或不能准确辨识的部分等仍较为敏感，且无法完成系统对有功和无功功率的直接控制。直接功率控制（Direct Power Control，DPC）是在 DTC 基础上将发电系统更为关注的有功和无功功率替代 DTC 中的电磁转矩和磁链等环节，借助 Bang-Bang 控制及控制绕组磁链所在扇区号，即可实现对功率绕组有功和无功功率的快速控制。与 DTC 相比，DPC 对系统功率的控制更为简洁、快速，且基本不依赖电机参数。同时，也可以将功率绕组无功功率参考值置 0 来实现系统单位功率因数控制需求。

本文首先给出了无刷双馈发电机变速恒频（Variable-Speed Constant-Frequency, VSCF）风力发电机理及其最大功率跟踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT）方法；然后，针对所提新型复合转子结构 BDFG，基于磁场调制理论推导该电机的空间矢量数学模型、等效电路及其转矩表达式，并定性分析该新型电机转子对电机定子磁场耦合能力及电磁转矩的增强作用；进而提出适于对有功和无功功率进行有效控制的直接功率控制方法；最后，基于 Matlab/Simulink®工具箱以及实验测试平台对 8/4 极 25kW 无刷双馈发电机样机直接功率控制系统进行特性仿真与实验测试的对比，研究结果有效证实了所提直接功率控制方法的正确性、有效性和可行性。

1　复合转子无刷双馈风力发电机的机理

1.1　变速恒频发电机理及最大功率跟踪

典型风能转换系统（Wind Energy Conversion Systems, WECS）中 BDFG 结构如图 1 所示[1]。图中，功率绕组（又称主绕组，极对数、频率分别为 p_p、f_p 或 ω_p）通常直接连工频电网，控制绕组（又称副绕组，极对数、频率分别为 p_c、f_c 或 ω_c，一般 $p_p>$

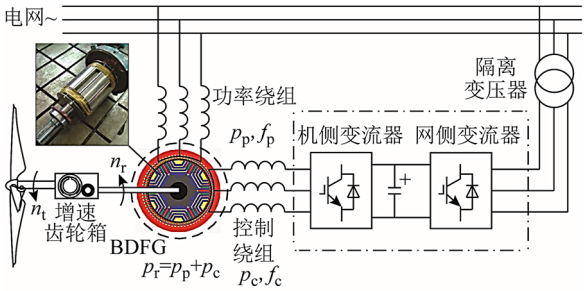


图 1　复合转子 BDFG 风力发电系统结构

Fig.1　Structure of (WECS) for BDFG with a hybrid rotor

p_c）则通过双向变流器连接至电网。“和调制”（$p_r = p_p + p_c$）下该发电机定子极对数、频率及转速 n_r 之间的关系为[14-15]

$$f_p = \frac{n_r\left(p_p + p_c\right)}{60} \pm f_c \tag{1}$$

$$\omega_{rm} = \frac{2\pi n_r}{60} = \frac{\omega_p + \omega_c}{p_r} = \omega_{syn}\left(1 + \frac{\omega_c}{\omega_p}\right) \tag{2}$$

式中，ω_{syn} 为同步转速，$\omega_{syn} = \omega_p / p_r$，此时控制绕组为直流励磁（$\omega_c = 0$）。当 $\omega_{rm} > \omega_{syn}$ 时，系统为超同步运行，f_c（或 ω_c）＞0；反之，则为亚同步运行，f_c（或 ω_c）＜0。

由贝兹理论可知[14]，任一风速下风力机的功率特性曲线上都有一个功率最大值点，因此，只需参考式（1）在风速变化时及时调节控制绕组励磁电流频率和相序，就既可以保证发电机处于最大功率值对应的转速，又可以实现功率绕组馈送恒定频率（f_p）的交流电，实现风能转换系统的最大功率跟踪及变速恒频发电运行，这也是 BDFG 适用于 VSCF 发电系统的优势所在。

1.2 复合转子 BDFG 的等效电路与电磁转矩

为确保双定子绕组均具有较高的绕组系数和灵活性，在充分提高转子磁场调制能力的同时，削弱两套定子绕组间的直接耦合，以消除某些谐波的不利影响。本文采用在 8/4 极径向叠片磁障式磁阻转子中适当嵌入同心式并联短路笼条构成的笼障复合转子结构[11-13]，展开图如图 2 所示。图中，t_1 为气隙宽度，t_2 为磁障厚度，g 为气隙长度。

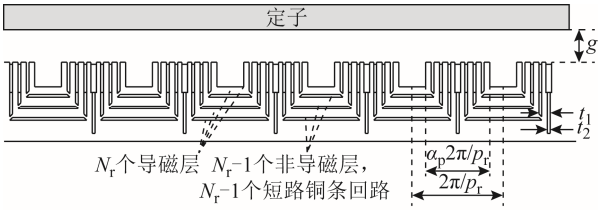


图 2 复合转子 BDFG 展开示意图

Fig.2 The expansion of BDFG with a hybrid rotor

文献[3]论证了磁阻转子与笼型转子无刷双馈电机统一形式的等效电路，因此，理想条件下由叠加定理可以得到该新型复合转子 BDFG 的等效电路如图 3 所示。则其电压平衡方程为

$$\boldsymbol{U}_p = R_p \boldsymbol{I}_p + \mathrm{j}\omega_p L'_p \boldsymbol{I}_p + \boldsymbol{E}'_{pc} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{U}_c = R_c \boldsymbol{I}_c + \mathrm{j}\omega_c L'_c \boldsymbol{I}_c + \boldsymbol{E}'_{cp} \tag{4}$$

式中，各电感及电动势分别为

$$L'_p = 2L_p - \frac{3}{2}\frac{L_{pr}^2 \angle (2\gamma_p)}{L_r} \tag{5}$$

$$L'_c = 2L_c - \frac{3}{2}\frac{L_{cr}^2 \angle (2\gamma_c)}{L_r} \tag{6}$$

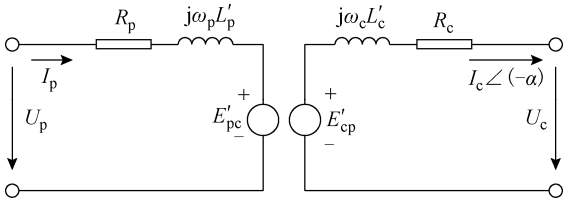


图 3 复合转子无刷双馈发电机等效电路

Fig.3 The equivalent circuit of BDFG with a hybrid rotor

$$\boldsymbol{E}'_{pc} = \mathrm{j}\omega_p L'_{pc} \boldsymbol{I}_c \tag{7}$$

$$\boldsymbol{E}'_{cp} = \mathrm{j}\omega_c L'_{pc} \boldsymbol{I}_p \tag{8}$$

$$L'_{pc} = \frac{3}{2}\frac{4}{\pi} rl \frac{\lambda_1}{2} \frac{N_p k_{Np1}}{p_p} \frac{N_c k_{Nc1}}{p_c} + \frac{3}{2}\frac{L_{pr} L_{cr}}{L_r} \tag{9}$$

式中，下标 p、c、r 分别表示功率绕组、控制绕组和转子绕组以及彼此之间的参数；L_p、L_c 和 L_{pr}、L_{cr} 分别为功率绕阻、控制绕组和它们与转子绕组之间的电感和互感参数；r 为定子内圆半径；l 为铁心长度；α 为功率绕组与控制绕组合成磁动势的夹角；γ_p、γ_c 分别为功率绕组和控制绕组与同极数转子绕组磁动势轴线间的电角度；γ 为电机转矩角，且 $\gamma = \gamma_p + \gamma_c$；$N_p$、$N_c$ 和 k_{Np1}、k_{Nc1} 分别为功率绕组、控制绕组的每相串联匝数和基波绕组折算系数。

新型复合转子 BDFG 的电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{3}{\omega_{rm}} \mathrm{Re}\left[\boldsymbol{E}'_{pc} \boldsymbol{I}_p^* + \boldsymbol{E}'_{cp} \boldsymbol{I}_c^*\right] = 3p_r L'_{pc} I_p I_c \sin\gamma \tag{10}$$

从上述分析可知，因式（9）的互感系数比传统磁阻转子 BDFG 增加了第二项参数，故由文献[4, 11-13]可知，所提新型复合转子结构对 BDFG 功率绕组与控制绕组之间互感及电磁转矩等均具有一定的增强作用，使得 BDFG 的磁场调制能力和电机本体性能得到改善与提升。

2 BDFG 直接功率控制策略的改进

2.1 BDFG 直接功率控制基础

由瞬时无功功率理论，得到 BDFG 功率绕组在 αβ 两相静止坐标系中的有功和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_p = \dfrac{3}{2}\left(u_{p\alpha} i_{p\alpha} + u_{p\beta} i_{p\beta}\right) \\ Q_p = \dfrac{3}{2}\left(u_{p\beta} i_{p\alpha} - u_{p\alpha} i_{p\beta}\right) \end{cases} \tag{11}$$

式中，$u_{p\alpha}$、$u_{p\beta}$ 和 $i_{p\alpha}$、$i_{p\beta}$ 分别为功率绕组电压或电流的 α 轴和 β 轴分量。

BDFG 直接转矩控制中的电磁转矩通常为[17]

$$T_{\mathrm{em}}=\frac{3\left(p_{\mathrm{p}}+p_{\mathrm{c}}\right)L_{\mathrm{p}}'}{2\left(L_{\mathrm{p}}'L_{\mathrm{c}}'-L_{\mathrm{pc}}'^{2}\right)}\left|\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{pc}}\right|\left|\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}\right|\sin\gamma \qquad (12)$$

式中，$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{pc}}$ 为功率绕组与控制绕组之间的互感磁链，$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{pc}}=L_{\mathrm{pc}}'\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{p}}/L_{\mathrm{p}}'$；$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 为控制绕组的磁链。

联合式（2）可以得到由转子输入发电机的机械功率及其功率绕组和控制绕组分量为[1,14]

$$P_{\mathrm{m}}=T_{\mathrm{em}}\omega_{\mathrm{rm}}=\underbrace{T_{\mathrm{em}}\frac{\omega_{\mathrm{p}}}{p_{\mathrm{r}}}}_{P_{\mathrm{pm}}\approx P_{\mathrm{p}}}+\underbrace{T_{\mathrm{em}}\frac{\omega_{\mathrm{c}}}{p_{\mathrm{r}}}}_{P_{\mathrm{cm}}\approx P_{\mathrm{c}}}=P_{\mathrm{pm}}\left(1+\frac{\omega_{\mathrm{c}}}{\omega_{\mathrm{p}}}\right) \qquad (13)$$

式中，P_{m}、P_{pm} 和 P_{cm} 分别为发电机转子输入的机械功率及其各定子绕组分量。

由图 1 可知，无穷大电网下 BDFG 功率绕组电压、频率 f_{p}、磁链 ψ_{p} 及互感磁链幅值 ψ_{pc} 等近似恒定。则式（13）若忽略 BDFG 定子绕组铜耗及其磁场储能变化，其电磁功率与机械功率大致相等，即 $P_{\mathrm{em}}\approx P_{\mathrm{m}}$ （$P_{\mathrm{pm}}\approx P_{\mathrm{p}}$，$P_{\mathrm{cm}}\approx P_{\mathrm{c}}$）。因此，可以通过对电磁转矩的控制来实现对系统有功功率 P_{p} 的控制，即通过对转矩角的控制来实现本文所提出的对 BDFG 功率绕组有功功率的控制。

对功率绕组无功功率的控制，可采用下述控制逻辑关系加以说明：由于 BDFG 与 DFIG 都基于双边励磁方式，在认为定子磁场恒定的条件下，若增加（或减少）某套绕组（如控制绕组）的励磁电流（即励磁磁场，其与无功功率成正比），则另一套绕组（即功率绕组）的励磁电流（无功功率）将会相应地减少（或增加），从而完成 DPC 中对系统无功功率的有效控制。

从上述有功和无功功率控制机理上看，系统的功率控制实际上是间接的，但考虑到其控制思想与直接转矩控制相似，故沿用 DTC 的定义方法，将其记为 DPC。

2.2　电压空间矢量选择与功率控制关系

为便于理解本文所提直接功率控制机理，将图 1 中星接（或角接）的三相控制绕组馈电用机侧变流器电压空间矢量 6 个扇区（Ⅰ~Ⅵ）60°等分如图 4 所示。其中，$\boldsymbol{u}_1$~$\boldsymbol{u}_6$ 为有效矢量，$\boldsymbol{u}_7$、$\boldsymbol{u}_8$ 为零矢量。三相六桥臂 IGBT 通断用三位二进制数字含义为：1 表示该相上桥臂导通、下桥臂截止，而 0 则表示该相下桥臂导通、上桥臂截止。

现以控制绕组磁链矢量 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 位于第Ⅰ扇区为例（见表 1 第 2 行），分析控制绕组电压空间矢量选择与系统有功和无功功率控制之间的关系。其中，若选

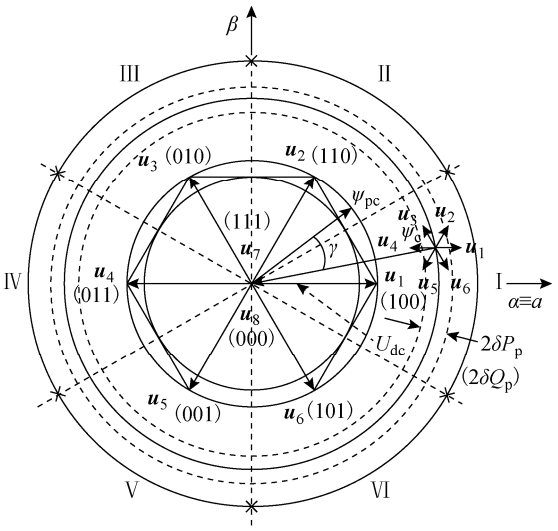


图 4　电压空间矢量、扇区划分及磁链位置

Fig. 4　Voltage space vector, sector division and flux position

择超前于 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 的电压矢量 $\boldsymbol{u}_2$ 或 $\boldsymbol{u}_3$，将使 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 逆时针方向旋转，γ 减小，而 T_{em} 和 P_{p} 等在数值上都将增加（发电时 T_{em}、P_{p} 均小于 0），即功率绕组向电网馈送的有功功率（$|P_{\mathrm{p}}|$）减小；若选择滞后于 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 的电压空间矢量 $\boldsymbol{u}_5$ 或 $\boldsymbol{u}_6$，将使 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 顺时针旋转，此时 γ 将增加，而 T_{em} 和 P_{p} 等在数值上都将减小，即功率绕组向电网馈送的有功功率（$|P_{\mathrm{p}}|$）将会增加。电压空间矢量与系统无功功率控制的关系是假定 BDFG 双励磁系统总磁场基本不变时，若选择与 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 夹角小于 90° 的 $\boldsymbol{u}_1$、$\boldsymbol{u}_2$、$\boldsymbol{u}_6$ 之一，将使 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 沿 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{pc}}$ 方向的分量增加，则此时由控制绕组“贡献”的励磁增加，即控制绕组将通过变流器提供更多的无功功率，而功率绕组“贡献”的励磁将可以相应地减少，其无功功率 Q_{p} 也将随之减少；反之，若选择电压空间矢量 $\boldsymbol{u}_3$、$\boldsymbol{u}_4$、$\boldsymbol{u}_5$ 之一，将使无功功率 Q_{p} 有所增加。其中，因 $\boldsymbol{u}_1$ 和 $\boldsymbol{u}_4$ 此时对 Q_{p} 作用效果过于剧烈而被舍弃。

表 1　电压空间矢量对有功和无功功率的影响

Tab. 1　Effects of the voltage space vectors on P_{p} and Q_{p}

扇区	功率变化			
	P_{p} 增加	P_{p} 减小	Q_{p} 增加	Q_{p} 减少
Ⅰ	$\boldsymbol{u}_2$, $\boldsymbol{u}_3$	$\boldsymbol{u}_6$, $\boldsymbol{u}_5$	$\boldsymbol{u}_3$, $\boldsymbol{u}_5$	$\boldsymbol{u}_2$, $\boldsymbol{u}_6$
Ⅱ	$\boldsymbol{u}_3$, $\boldsymbol{u}_4$	$\boldsymbol{u}_1$, $\boldsymbol{u}_6$	$\boldsymbol{u}_4$, $\boldsymbol{u}_6$	$\boldsymbol{u}_3$, $\boldsymbol{u}_1$
Ⅲ	$\boldsymbol{u}_4$, $\boldsymbol{u}_5$	$\boldsymbol{u}_2$, $\boldsymbol{u}_1$	$\boldsymbol{u}_5$, $\boldsymbol{u}_1$	$\boldsymbol{u}_4$, $\boldsymbol{u}_2$
Ⅳ	$\boldsymbol{u}_5$, $\boldsymbol{u}_6$	$\boldsymbol{u}_3$, $\boldsymbol{u}_2$	$\boldsymbol{u}_6$, $\boldsymbol{u}_2$	$\boldsymbol{u}_5$, $\boldsymbol{u}_3$
Ⅴ	$\boldsymbol{u}_6$, $\boldsymbol{u}_1$	$\boldsymbol{u}_4$, $\boldsymbol{u}_3$	$\boldsymbol{u}_1$, $\boldsymbol{u}_3$	$\boldsymbol{u}_6$, $\boldsymbol{u}_4$
Ⅵ	$\boldsymbol{u}_1$, $\boldsymbol{u}_2$	$\boldsymbol{u}_5$, $\boldsymbol{u}_4$	$\boldsymbol{u}_2$, $\boldsymbol{u}_4$	$\boldsymbol{u}_1$, $\boldsymbol{u}_5$

综上，得到电压空间矢量与系统功率控制的关系见表 1。若 $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{c}}$ 位于第 k 个扇区（k 为Ⅰ~Ⅵ），选择 $\boldsymbol{u}_{k+1}$ 或 $\boldsymbol{u}_{k+2}$ 将导致功率绕组馈送的有功功率减小，

而选择 $\boldsymbol{u}_{k-1}$ 或 $\boldsymbol{u}_{k-2}$ 将导致功率绕组馈送的有功功率增加；选择 $\boldsymbol{u}_{k+1}$ 或 $\boldsymbol{u}_{k-1}$ 将导致 Q_p 减小，而选择 $\boldsymbol{u}_{k+2}$ 或 $\boldsymbol{u}_{k-2}$ 都将导致 Q_p 增加。

定义 DPC 中有功和无功功率滞环比较函数为

$$\mathrm{d}(P_p,Q_p)=\begin{cases}1 & (P_p^*,Q_p^*)-(P_p,Q_p)\geqslant\delta(P_p,Q_p)\\ 0 & (P_p^*,Q_p^*)-(P_p,Q_p)<-\delta(P_p,Q_p)\end{cases} \quad (14)$$

式中，δP_p 和 δQ_p 分别为系统有功和无功功率滞环比较器阈值（本文设置为±0.2kW 和±0.2kvar）。

由式（14）可以得到功率滞环比较器输出与电压空间矢量关系见表 2。

表 2 功率滞环比较器输出与电压空间矢量选择

Tab.2 Power hysteresis comparators output and voltage space vector selection

$\mathrm{d}P_p$	$\mathrm{d}Q_p$	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
1	1	$\boldsymbol{u}_3$	$\boldsymbol{u}_4$	$\boldsymbol{u}_5$	$\boldsymbol{u}_6$	$\boldsymbol{u}_1$	$\boldsymbol{u}_2$
	0	$\boldsymbol{u}_2$	$\boldsymbol{u}_3$	$\boldsymbol{u}_4$	$\boldsymbol{u}_5$	$\boldsymbol{u}_6$	$\boldsymbol{u}_1$
0	1	$\boldsymbol{u}_5$	$\boldsymbol{u}_6$	$\boldsymbol{u}_1$	$\boldsymbol{u}_2$	$\boldsymbol{u}_3$	$\boldsymbol{u}_4$
	0	$\boldsymbol{u}_6$	$\boldsymbol{u}_1$	$\boldsymbol{u}_2$	$\boldsymbol{u}_3$	$\boldsymbol{u}_4$	$\boldsymbol{u}_5$

综合表 1 和表 2，得到系统 Q_p 期望值与扇区号及电压空间矢量之间的唯一关系见表 3。

表 3 无功功率期望值与扇区变化方向关系

Tab.3 Relationship between the expected rate of Q_p and sector increments

扇区	矢量					
	$\boldsymbol{u}_1$	$\boldsymbol{u}_2$	$\boldsymbol{u}_3$	$\boldsymbol{u}_4$	$\boldsymbol{u}_5$	$\boldsymbol{u}_6$
Ⅰ	x	−|−1	+|+1	x	+|−1	−|+1
Ⅱ	−|+1	x	−|−1	+|+1	x	+|−1
Ⅲ	+|−1	−|+1	x	−|−1	+|+1	x
Ⅳ	x	+|−1	−|+1	x	−|−1	+|+1
Ⅴ	+|+1	x	+|−1	−|+1	x	−|−1
Ⅵ	−|−1	+|+1	x	+|−1	−|+1	x

注：“+”和“−”分别表示选择该电压空间矢量将使 Q_p 变化率期望值增加或减少；“+1”和“−1”分别表示扇区号将增加（ψ_c 逆时针方向旋转）或减小（ψ_c 顺时针方向旋转）；“x”表示该电压空间矢量被舍弃。

以 ψ_c 位于第Ⅰ扇区为例，此时若需要减小无功功率、增加扇区号，则应采用 $\boldsymbol{u}_6$；若需要增加无功功率、减小扇区号，则只需采用 $\boldsymbol{u}_5$。

3 控制系统特性仿真与实验

3.1 控制系统模型及参数给定

DPC 系统框图如图 5 所示。工作时，系统实时计算功率绕组的有功和无功功率，由功率滞环比较器得到功率偏差信号，再结合控制绕组磁链所在扇区号，最终以查表方式（见表 1~表 3）得到电压空间矢量，实现系统 VSCF 及 MPPT 的直接功率控制。

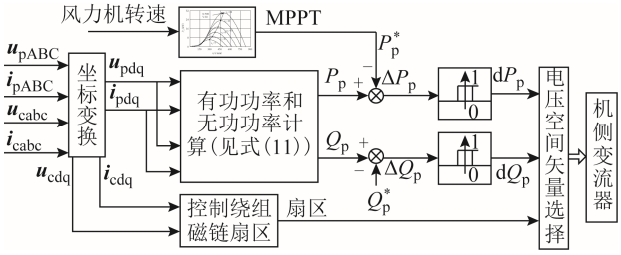


图 5 直接功率控制系统原理框图

Fig.5 The principle diagram of proposed DPC system

BDFG 样机参数：额定功率为 25kW，额定电压为 380V，功率/控制绕组极对数为 4/2，功率绕组的电阻、电感为 0.387 1Ω、40.24mH，控制绕组的电阻和电感为 0.377 3Ω、48.89mH，互感为 38.38mH。控制系统参数给定值如图 6 所示。图中，假定风速 v_w 在 3.2s 时由 10m/s 阶跃到 11m/s，对应的发电机转速、有功功率和无功功率参考值分别为 417r/min、459r/min、−11.8kW、−15.4kW、−2kvar、0kvar、2kvar。

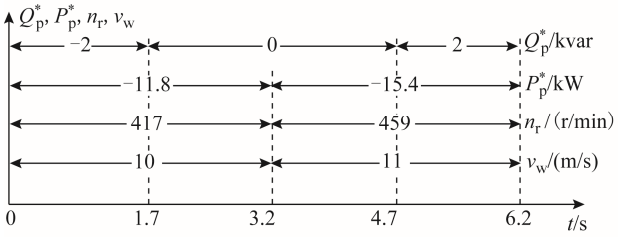


图 6 直接功率控制系统参数给定

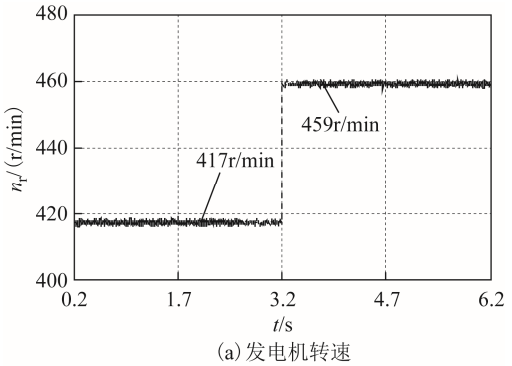
Fig.6 Reference values of the proposed DPC system

3.2 仿真结果

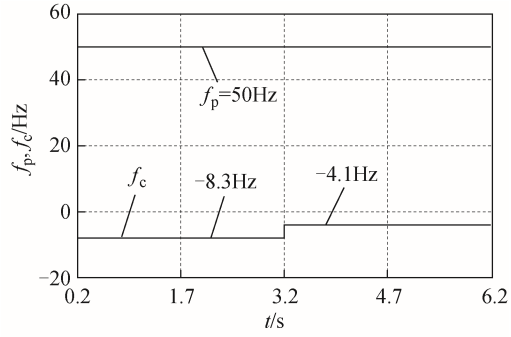
忽略系统起动过渡过程，得到如图 7 所示 DPC 系统特性仿真结果。限于篇幅，本文将对仿真结果和实验测试进行对比分析。

3.3 实验验证及对比分析

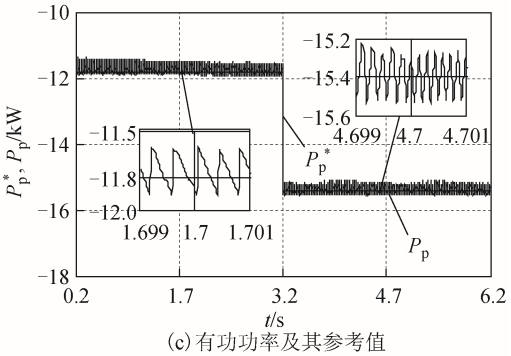
控制系统实验室测试平台如图 8 所示，包括模拟风力机运行的感应电动机及其调速用变频器、BDFG、



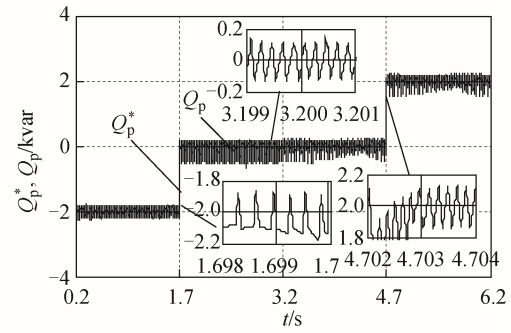
(a)发电机转速



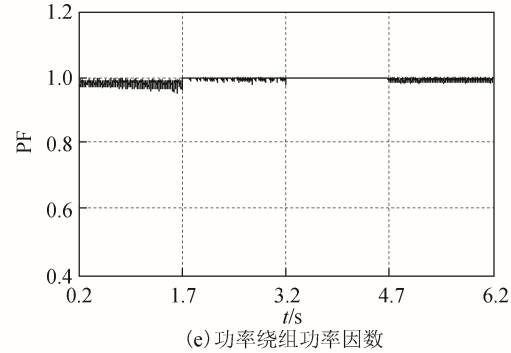
(b) 定子绕组励磁电流频率



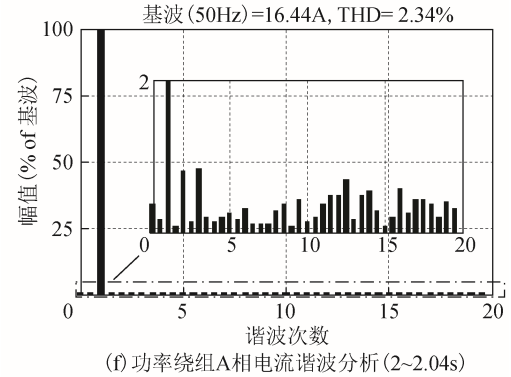
(c) 有功功率及其参考值



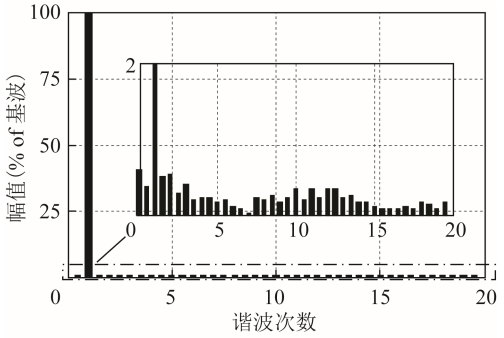
(d) 无功功率及其参考值



(e) 功率绕组功率因数



(f) 功率绕组A相电流谐波分析(2~2.04s)



(g) 功率绕组A相电流谐波分析(4~4.04s)

图 7　直接功率控制仿真结果

Fig.7　Simulation results of the proposed DPC

隔离变压器、LCL 滤波器、控制绕组变流器、智能负载、功率分析仪、示波器等。与图 7 仿真结果对比的控制系统实验测试结果如图 9 所示。

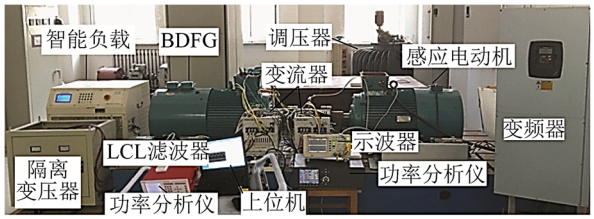
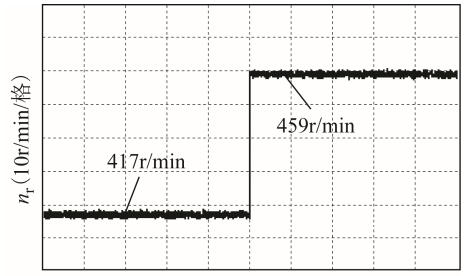


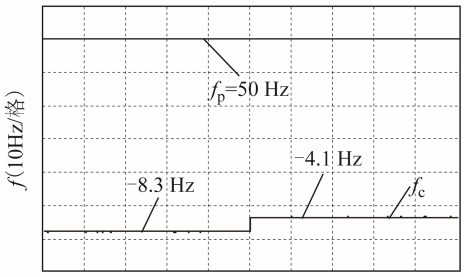
图 8　BDFG 系统实验测试平台

Fig.8　The experimental test rig for BDFG

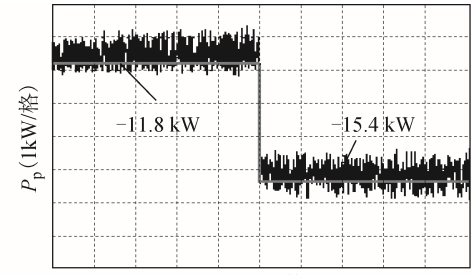
图 7a、图 7b 和图 9a、图 9b 为发电机转速（417r/min 和 459r/min）与频率特性（工频 50Hz 和 −8.3Hz、−4.1Hz）。显然，控制系统可以根据风速变化（10m/s 和 11m/s），通过及时调整控制绕组图 7 励磁电流频率，确保系统的变速恒频发电运行；图 7c~图 7e 和图 9 c~图 7e 分别为系统有功和无功功率参



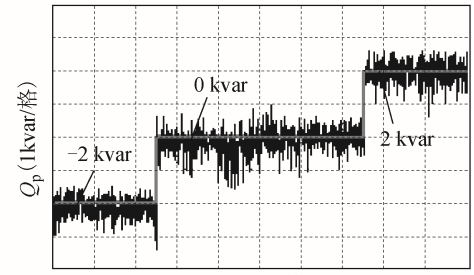
(a) 发电机转速



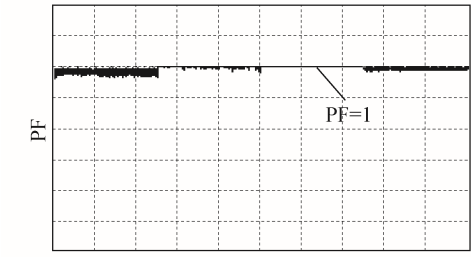
(b) 定子绕组励磁电流频率



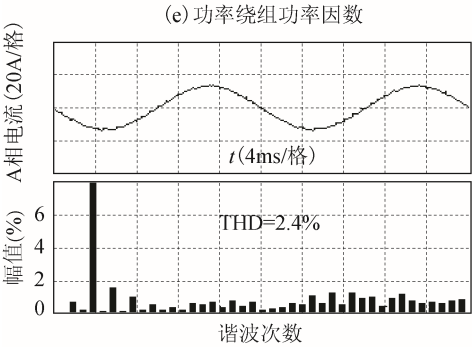
(c) 有功功率及其参考值



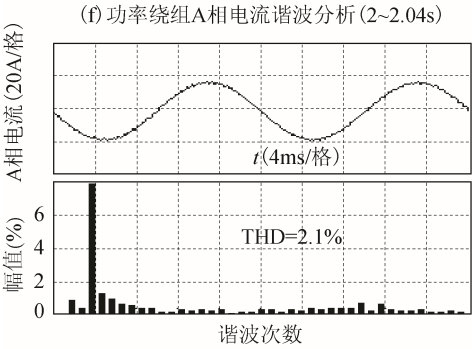
(d) 无功功率及其参考值



(e) 功率绕组功率因数



(f) 功率绕组A相电流谐波分析(2~2.04s)



(g) 功率绕组A相电流谐波分析(4~4.04s)

图 9 直接功率控制系统实验测试结果

Fig.9 Experimental tests of the proposed DPC system

考值、实际值及功率因数特性，可见，系统的有功功率 MPPT（−11.8kW、−15.4kW）控制特性较好，且 1.7~4.7s 间实现了功率绕组的单位功率因数控制（Q_p=0）；图 7 f、图 7g 和图 9f、图 9g 分别为功率绕组 A 相电流两个不同时间周期的傅里叶分析结果，可见，所提直接功率控制系统总谐波畸变率较低，分别仅为 2.34%、2.23%和 2.4%、2.1%。

4 结论

本文提出了一种磁障式磁阻转子辅以同心式并联短路笼条结构的新型复合转子无刷双馈风力发电机，推导了与磁阻转子 BDFG 等效的电压平衡方程、等效电路及电磁转矩表达式，并定性分析了复合转子结构对 BDFG 磁场调制能力和电磁转矩的增强作用。针对大容量风力发电系统，尤其是海上风电系统发电机单机容量越来越大及其对功率控制越来越高的客观要求，采用直接功率控制对 8/4 极 25kW 新型无刷双馈发电机样机控制系统进行了较为详细的仿真与实验，理论分析及实验测试结果均证实了所提新型复合转子无刷双馈风力发电机变速恒频发电及其最大功率跟踪的直接功率控制系统的正确性、可行性和有效性。

参考文献

[1] Jovanović M G, Chaal H. Wind power applications of doubly-fed reluctance generators with parameter-free hysteresis control[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 134(15): 399-409.

[2] 贾磊, 王雪帆, 熊飞. 700 kW 船用轴带无刷双馈发电机的设计与测试[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 32-42.
Jia Lei, Wang Xuefan, Xiong Fei. Design and test of a 700 kW ship shaft brushless doubly fed generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 32-42.

[3] 张凤阁, 王凤祥, 徐隆亚. 磁阻和笼型转子无刷双馈电机的统一等效电路和转矩公式[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 28-31.
Zhang Fengge, Wang Fengxiang, Xu Longya. The equivalent circuit and torque formula of doubly fed brushless machine with reluctance and cage rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 28-31.

[4] 蒋晓东, 张凤阁, 周党生, 等. 双定子笼障转子无刷双馈发电机冷却空气流变特性数值分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 466-473.
Jiang Xiaodong, Zhang Fengge, Zhou Dangsheng, et al. Numerical analysis of cooling air flow characteristic for double stator cage-barrier rotor brushless doubly-fed generator[J]. Transactions of

China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 466-473.

[5] 姜云磊, 程明, 王青松, 等. 不平衡负载下双定子无刷双馈发电机独立运行控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 998-1006.
Jiang Yunlei, Cheng Ming, Wang Qingsong, et al. Control strategy of stand-alone brushless doubly-fed induction generator system under unbalanced loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 998-1006.

[6] 韩力, 高强, 罗辞勇, 等. 不同转子结构无刷双馈电机的运行特性对比[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(3): 9-14, 20.
Han Li, Gao Qiang, Luo Ciyong, et al. Comparasion on the performance of brushless doubly-fed machine with different rotor structures[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(3): 9-14, 20.

[7] Njiri J G, Soffker D. State-of-the-art in wind turbine control： trends and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 377-393.

[8] Tohidi S, Oraee H, Zolghadri M R, et al. Analysis and enhancement of low-voltage ride-through capability of brushless doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 1146-1155.

[9] Xu Longya, Guan Bo, Liu Huijuan, et al. Design and control of a high-efficiency doubly-fed brushless machine for wind power generator application[C]// 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, Georgia, 2010: 2409-2416.

[10] Dorrell D G, Jovanović M. On the possibilities of using a brushless doubly-fed reluctance generator in a 2MW wind turbine[C]//2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, AB, Canada, 2008: 1-8.

[11] 张凤阁, 王秀平, 贾广隆, 等. 无刷双馈电机复合转子结构参数的优化设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 77-84.
Zhang Fengge, Wang Xiuping, Jia Guanglong, et al. Optimum design for composite rotor structural parameters of brushless doubly fed machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 77-84.

[12] 张凤阁, 王秀平, 于思洋, 等. 不同转子结构无刷双馈电动机转子耦合能力与运行性能的对比分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2816-2826.
Zhang Fengge, Wang Xiuping, Yu Siyang, et al. Comparative analysis and experimental research of coupling capability and operating characteristics for brushless doubly fed motors with different rotor structures characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2816-2826.

[13] Zhang Fengge, Yu Siyang, Wang Yutao, et al. Design and performance comparisons of brushless doubly fed generators with different rotor structures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 631-640.

[14] Ademi S, Jovanović M G, Hasan M. Control of brushless doubly-fed reluctance generators for wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 596-604.

[15] Ademi S, Jovanović M G. Vector control methods for brushless doubly fed reluctance machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 96-104.

[16] Chaal H, Jovanović M G. Toward a generic torque and reactive power controller for doubly fed machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 113-121.

[17] Sarasola I, Poza J, Rodriguez M A, et al. Direct torque control design and experimental evaluation for the brushless doubly fed machine[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(2): 1226-1234.

[18] Chaal H, Jovanović M G. Practical implementation of sensorless torque and reactive power control of doubly fed machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic, 2012, 59(6): 2645-2653.

[19] 赵荣理, 张爱玲, 田慕琴, 等. 笼型转子无刷双馈发电机的间接功率控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 1-8.
Zhao Rongli, Zhang Ailing, Tian Muqin, et al. Indirect power control strategy for brushless doubly-fed induction generator[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(9): 1-8.

作者简介

苏晓英　女，1980 年生，博士研究生，讲师，研究方向为电力电子与电力传动、无刷双馈发电机及其控制。

E-mail：9797419@qq.com

张凤阁　男，1963 年生，博士，教授，博士研究生导师，研究方向为特种电机及其控制。

E-mail：sut_zhangfg@163.com（通信作者）

（编辑　郭丽军）