

无刷双馈电机在独立电源系统中应用的仿真研究

姜忠山¹, 王赛¹, 崔翰明²

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军驻景德镇地区代表室, 江西 景德镇 333000)

摘要: 分析了无刷双馈电源系统变速恒频的运行原理, 结合独立电源系统的特点, 建立了系统在空中载和带负载状态下的数学模型; 对系统空载至负载、转速突变、负载突变等情况进行了仿真研究, 分析了系统动态特性; 通过仿真验证, 可以实现变速恒频发电, 而且通过电压的标量控制可以实现系统输出电压的恒定。

关键词: 变速恒频; 无刷双馈电机; 系统建模; 独立电源系统; 仿真研究

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2014.04.004

[中图分类号] TM310 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2014)04-0010-03

Simulation Study on Application of BDFG in Stand-alone Power Supply Systems

JIANG Zhong-shan¹, WANG Sai¹, CUI Han-ming²

(1. Naval Navigation Engineering College, Yantai Shandong 264001, China;

2. Jingdezhen Naval Representative Office, Jingdezhen Jiangxi 333000, China)

Abstract: According to the characteristics of the stand-alone power supply system, this paper analyses the operational principle of the variable speed constant frequency (VSCF) of the brushless doubly-fed generator (BDFG) and establishes mathematical models with zero load and with load. A simulation study is made on the zero load to load transfer, rotating speed mutation and load mutation, and dynamic characteristics of the system is analyzed. Through simulation, it is verified that this system can realize VSCF generation and constant system output voltage can be obtained through scalar voltage control.

Keywords: VSCF; BDFG; system modeling; stand-alone power supply system; simulation study

0 引言

独立电源系统是指航空航天器、汽车、轮船等电源系统的总称。近年来, 随着各种先进设备的出现, 对独立电源系统的供电性能提出了更高的要求, 开发高质量高品质的独立电源系统受到了业界高度的重视, 并取得了一些成果。

无刷双馈电机 (Brushless Double-Fed Generator, BDFG) 是一种有着广阔应用前景的新型电机, 该电机变频器容量小, 无电刷和滑环, 可以运行于亚同步速、同步速、超同步速, 实现变速恒频发电^[1], 目前, 对于双馈发电机^[2]和无刷双馈发电机^[3]及其控制策略的研究, 多集中在风力发电^[4]等并网型电源系统。可见, 将其应用于独立电源系统, 有重要的科学意义和重大的推广应用价值。

1 BDFG 独立电源系统运行原理

如图 1 所示, BDFG 的定子装有两套不同极对数的绕组, 一套绕组接电网或负载, 称为功率绕组, 极对数为 p_p ; 另一套绕组通过功率变换器接入定子, 称之为控制绕组, 极对数为 p_c 。

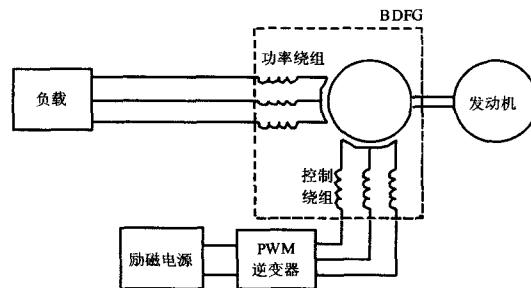


图1 BDFG 独立电源系统结构图
则功率绕组供电频率为:

$$f_p = \frac{p_p n_p}{60} = \frac{n_r (p_p + p_c)}{60} \pm f_c \quad (1)$$

由式(1)可以看出, 通过调节控制绕组的频率 f_c , 就可以调节功率绕组的频率 f_p , 即可以实现独立电源系统的变速恒频发电。

2 BDFG 独立电源系统数学模型

文献^[5]给出了风力发电等并网型发电系统的转子速 $d-q$ 坐标系的数学模型:

$$\begin{bmatrix} u_{pds} \\ u_{pqs} \\ u_{cds} \\ u_{cqs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ps} + pl_{ps} & -p_p \Omega_r l_{ps} & 0 & 0 & pl_m & -p_p \Omega_r l_{pm} \\ p_p \Omega_r l_{ps} & r_{ps} + pl_{ps} & 0 & 0 & p_p \Omega_m l_{pm} & pl_m \\ 0 & 0 & r_{cs} + pl_{cs} & -p_c \Omega_r l_{cs} & -pl_{cm} & -p_c \Omega_r l_{cm} \\ 0 & 0 & p_c \Omega_r l_{cs} & r_{cs} + pl_{cs} & -p_c \Omega_r l_{cm} & pl_{cm} \\ pl_{pm} & 0 & -pl_{cm} & 0 & r_r + pl_r & 0 \\ 0 & pl_{pm} & 0 & pl_{cm} & 0 & r_r + pl_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pds} \\ i_{pqs} \\ i_{cds} \\ i_{cqs} \\ i_{pdr} \\ i_{pqr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

并网型电源系统实际上是一种受控电源,其功率绕组定子侧接无穷大电网,其电压不可控且负载不可分析。当应用于独立电源系统时,应确保其输出电压幅值的恒定,而由于是带独立负载易分析,应首先针对该系统功率绕组端的特点,建立起 BDFG 独立电源系统的数学模型。

在定子功率绕组侧,采用发电机惯例,电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{pds} \\ u_{pqs} \end{bmatrix} = -r_{ps} \begin{bmatrix} i_{pds} \\ i_{pqs} \end{bmatrix} - p_p \Omega_r \begin{bmatrix} -\psi_{pqs} \\ \psi_{pds} \end{bmatrix} - p \begin{bmatrix} \psi_{pqs} \\ \psi_{pds} \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设所带三相负载阻抗 $Z_l = R_l + jX_l$, 则:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{cds} \\ u_{cqs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{ps} - R_l + pl_{ps} & p_p \Omega_r l_{ps} + X_l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -p_p \Omega_r l_{ps} - X_l & -r_{ps} - R_l + pl_{ps} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} + pl_{cs} & -p_c \Omega_r l_{cs} & -pl_{cm} & -p_c \Omega_r l_{cm} \\ 0 & 0 & p_c \Omega_r l_{cs} & r_{cs} + pl_{cs} & -p_c \Omega_r l_{cm} & pl_{cm} \\ 0 & pl_{cm} & 0 & 0 & -pl_{cm} & 0 \\ 0 & 0 & pl_{cm} & 0 & 0 & r_r + pl_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pds} \\ i_{pqs} \\ i_{cds} \\ i_{cqs} \\ i_{pdr} \\ i_{pqr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = p_p l_{pm} (i_{pds} i_{pqr} - i_{pqs} i_{pdr}) + p_c l_{cm} (i_{cds} i_{pqr} + i_{cqs} i_{pdr}) \quad (7)$$

在式中,下标 p, c, r, l 分别表示功率绕组、控制绕组、转子和负载;下标 d, q 表示 d 轴分量和 q 轴分量; Ω_r 表示转子机械角速度; u, i 表示电压和电流的瞬时值; p 表示微分算子。

特殊地,空载情况时,功率侧电流 i_{pds}, i_{pqs} 均为零,其数学模型可简化为:

$$\begin{bmatrix} u_{cds} \\ u_{cqs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{cs} + pl_{cs} & -p_c \Omega_r l_{cs} & -pl_{cm} & -p_c \Omega_r l_{cm} \\ p_c \Omega_r l_{cs} & r_{cs} + pl_{cs} & -p_c \Omega_r l_{cm} & pl_{cm} \\ -pl_{cm} & 0 & r_r + pl_r & 0 \\ 0 & pl_{cm} & 0 & r_r + pl_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cds} \\ i_{cqs} \\ i_{pdr} \\ i_{pqr} \end{bmatrix} \quad (8)$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = p_c l_{cm} (i_{cds} i_{pqr} + i_{cqs} i_{pdr}) \quad (9)$$

3 BDFG 独立电源系统的动态仿真

为研究 BDFG 独立电源系统的动态特性,在 MATLAB/Simulink 环境下对系统进行仿真(如图 2)。

仿真用 BDFG 的参数如下: $l_{cs} = 0.158 \text{ H}$, $l_{cm} = 0.147 \text{ H}$, $l_r = 0.298 \text{ H}$, $r_{cs} = 5.3 \text{ } \Omega$, $r_r = 7.6 \text{ } \Omega$, $l_{ps} = 0.178 \text{ H}$, $l_{pm} = 0.169 \text{ H}$, $r_{ps} = 3.46 \text{ } \Omega$, $p_p = 3$, $p_c = 1$ 。

由于功率绕组端不接无穷大电网,要实现 BDFG 独立电源系统电压的恒定,在仿真过程中需要对电压进行标量控制。

在整个过程中,为了对系统由空载至接入负载,转速变化分别运行于亚同步速、同步速、超同步速以及对负载突变的动态过程进行仿真,实现输出为 220 V, 50 Hz 三相交流电,具体如下:

在 0 ~ 1 s 时刻,发动机转速在亚同步速 600 r/min,励磁频率 $f_c = 10 \text{ Hz}$,系统处于空载状态;在 1 s 时刻接入负载 Z_l 运行,其中 $R_l = 100 \text{ } \Omega$, $L_l = 0.32 \text{ H}$,此时发动机的转速与励磁频率不变;4 s 时转速增加至同步速 750 r/min,此时 $f_c = 0 \text{ Hz}$;6 s 时再次增加转速至超同步速 900 r/min, $f_c = 10 \text{ Hz}$;8 s 时增加负载至 $R_l = 150 \text{ } \Omega$, $L_l = 0.4 \text{ H}$,转速与励磁频率保持不变。

图 4 为功率绕组输出相电流波形,输出结果验证了 BDFG 独

定子功率绕组侧磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_{pds} \\ \psi_{pqs} \end{bmatrix} = l_{ps} \begin{bmatrix} i_{pds} \\ i_{pqs} \end{bmatrix} + l_{pm} \begin{bmatrix} i_{pdr} \\ i_{pqr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(3)、(4)带入式(5)可以重新改写式(2)式中的前两式,在式中,功率绕组采用发电机惯例,控制绕组采用电动机惯例,得到 BDFG 独立电源系统转子 $d-q$ 轴坐标系的数学模型:

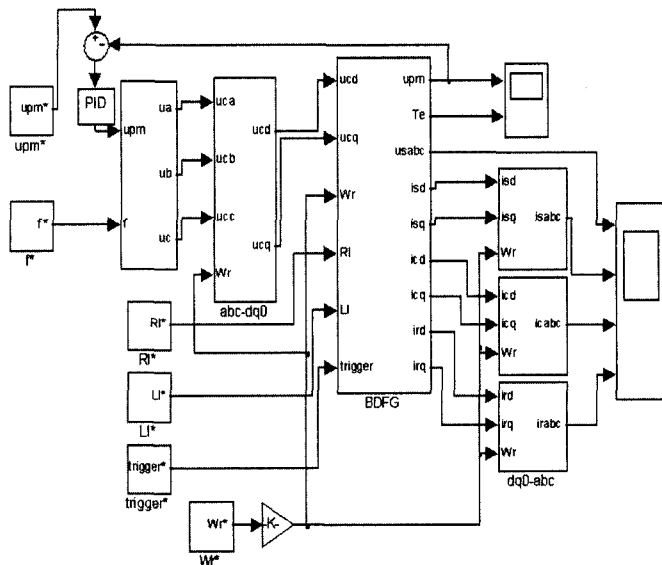


图 2 BDFG 独立电源系统 MATLAB 仿真

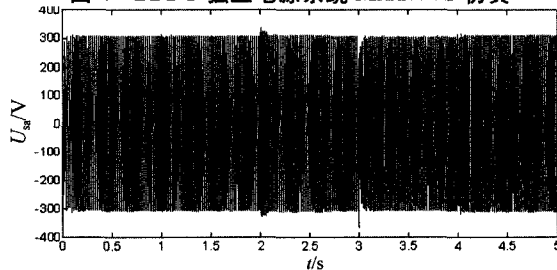


图 3 功率绕组相电压波形

立电源系统可以实现变速恒频发电,图 3 为功率绕组输出相电压波形,可以看出,通过电压的标量控制可以实现功率绕组输出电压的恒定;通过图 5 可以看出,变速恒频是通过调节控制绕组的励磁频率实现的,输出电压大小则是通过改变控制绕组电流大小来实现的;通过图 6 可以看出,电磁转矩在稳态运行时保持恒定,当转速超过同步速时,由于控制绕组电流相序相反,其电磁转矩出现较大波动,另外,电磁转矩随着转速与负载的增大而增大,电磁转矩显示为阻转矩也和发电机的特性一致。

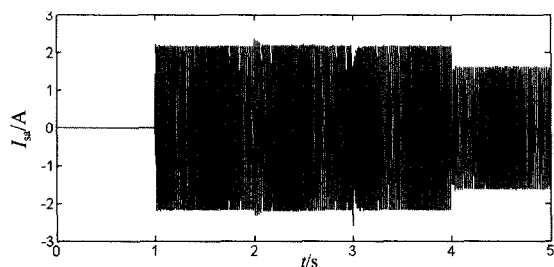


图 4 功率绕组相电流波形

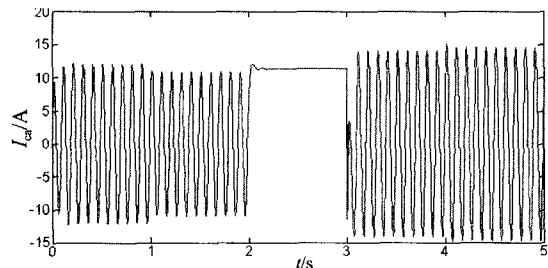


图 5 控制绕组相电流波形

4 结束语

本文研究了 BDFG 在独立电源系统中的应用。在 BDFG 转子速 $d-q$ 坐标数学模型的基础上,建立了 BDFG 独立电源系统的双同步速 MT 坐标系的数学模型,包括系统的负载模型与空

载模型;最后对系统空载至负载、转速突变、负载突变等情况进行了仿真研究,验证了该系统可以实现变速恒频恒压的输电。

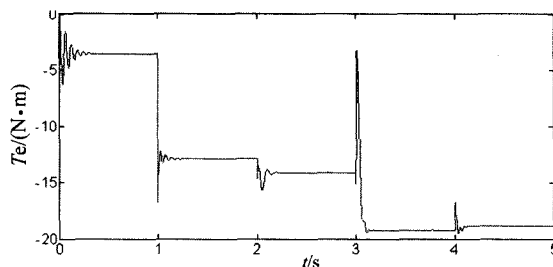


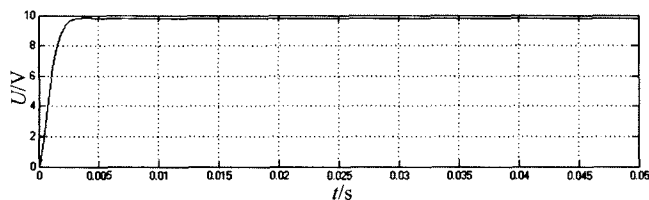
图 6 系统电磁转矩

参考文献:

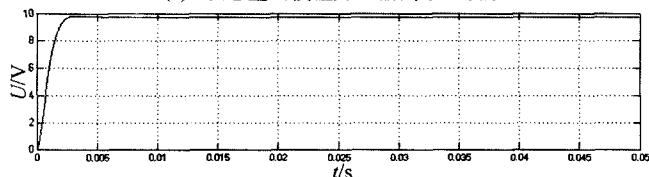
- [1] 焦卫星,程小华. 无刷双馈电机智能控制策略综述[J]. 微电机,2011, 44(6):91-94.
- [2] 林成武,王凤翔,姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):122-125.
- [3] 黄守道. 无刷双馈电机的控制方法研究[D]. 长沙:湖南大学博士论文,2005,25(4):87-93.
- [4] 金石. 变速恒频无刷双馈风力发电机的直接转矩控制技术研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学博士论文,2011:75-88.
- [5] 卞松江,贺益康,潘再平. 级联式无刷双馈电机的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报,2001,21(12):34-37.

【作者简介】姜忠山(1963-),男,山东人,副教授,专业:飞行器电气工程。

(上接第 3 页)



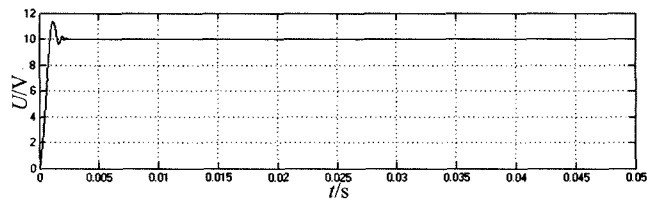
(a) 状态空间模型开环输出电压波形



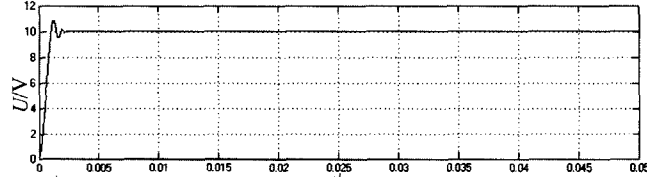
(b) 电路仿真模型开环输出电压波形

图 5 两种模型开环输出电压波形比较

导意义。同样,此方法也适用于其它拓扑结构的电路。



(a) 状态空间模型闭环输出电压波形



(b) 电路仿真模型闭环输出电压波形

图 7 两种模型闭环输出电压波形比较

参考文献:

- [1] Teuvo Suntio. Dynamic Profile of Switched-Mode Converter: Modeling, Analysis and Control[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [2] 余少敏. 数字控制 DC/DC 变换器的系统建模与分析[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
- [3] 董锋斌,皇金锋. 基于状态空间法的 DC-DC 变换器的统一建模研究[J]. 电气技术,2008,9(7):21-23.
- [4] 葛茂艳,谢理理,吴喜华. 非理想 Buck 变换器的建模及仿真[J]. 计算机仿真,2010,27(4):333-336.
- [5] 吕庆永,黄世震,林伟. Buck 变换器在 SIMULINK 下的建模仿真[J]. 通信电源技术,2008,25(6):1-3.
- [6] 郑鹏程,石玉,周立文,等. 基于 MATLAB 的 DC/DC 变换器设计与闭环仿真[J]. 磁性材料及器件,2011,42(4):63-66.

【作者简介】孙路(1988-),男,河北人,硕士研究生;研究方向:电机与电器。

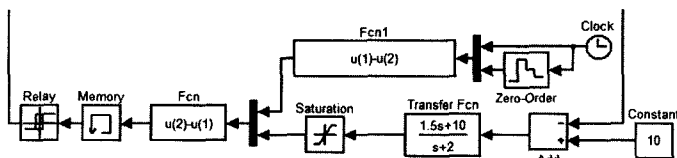


图 6 闭环反馈控制实现

5 结束语

本文基于状态空间平均法建立了 CCM 模式下非理想 Buck 变换器模型,并借助 MATLAB/Simulink 仿真工具,依照实际电路参数而搭建状态空间仿真模型和电路仿真模型。两种仿真输出电压波形结果很好吻合,表明基于状态空间平均法建立的开关变换器模型对于参数理论分析计算和实际电路设计都有一定的指