

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.08.010

无刷双馈电机稳态数学模型和运行特性分析

韩力, 罗杰, 王华, 潘红广

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了深入研究笼型转子无刷双馈电机 (brushless doubly-fed machine, BDFM) 的稳态特性, 从耦合电路出发, 给出了 BDFM 的基本方程式, 进而分析并得到了 BDFM 电流、有功功率、无功功率、电磁转矩和功率因数的数学模型。在此基础上, 通过 Matlab 对 1 台样机进行了仿真, 获得了 BDFM 的矩角特性、矩频特性、功角特性、无功特性、功率因数特性和 V 形曲线, 并利用数学模型分析了 BDFM 的能量转换。结果表明: BDFM 的各种稳态特性均可表示为控制绕组电压、频率和功角这 3 个变量的函数, 所提出的模型简化了 BDFM 稳态特性的分析方法, 为进一步研究 BDFM 的稳定性和控制策略奠定了理论基础。

关键词: 无刷双馈电机; 交流电机; 耦合电路; 数学模型; 稳态特性; 能量转换

中图分类号: TM301; TM34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2013)08-061-07

Analysis on steady-state mathematical models and operating characteristics of brushless doubly-fed machine

HAN Li, LUO Jie, WANG Hua, PAN Hongguang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To further study the steady-state characteristics of brushless doubly-fed machine (BDFM) with squirrel-rotor, the basic equations are given according to the coupling circuits of BDFM. And then, the mathematical models of BDFM current, active power, reactive power, electromagnetic torque and power factor are analyzed and derived respectively. Furthermore, the characteristics of torque-angle, torque-frequency, power-angle, reactive power, power factor and V-shaped curve of BDFM are obtained respectively by MATLAB simulation of a prototype. The energy conversion of BDFM is analyzed by the proposed mathematical models at the same time. The results show that all the steady-state characteristics of BDFM can be expressed as the functions of the control windings voltage, frequency and the power angle. The proposed model simplifies the analysis of the steady-state characteristics of BDFM and provides a theoretical foundation for the further study on operating stability and control strategy of BDFM.

Key words: brushless doubly-fed machine; AC motors; coupling circuits; mathematical models; steady state characteristics; energy conversion

收稿日期: 2013-03-06

基金项目: 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目 (2007DA10512709203)

作者简介: 韩力 (1963-), 男, 重庆大学教授, 博士, 主要从事电机设计及控制研究, (E-mail) hanli@cqu.edu.cn.

作为一种新型交流电机,无刷双馈电机(BDFM)取消了电刷和滑环,具有运行可靠、变频器容量小、转速和功率因数可调、系统成本低等优点,在电动机变频调速运行以及发电机变速恒频运行方面具有良好的应用前景^[1-2]。

近年来,BDFM 由于其独特的运行特性而受到广泛关注。文献[3-4]介绍了 BDFM 的基本结构和工作原理,文献[5-6]分别通过小信号分析对 BDFM 的开环和闭环稳定运行范围进行了理论计算,并通过相关实验进行了验证,文献[7-8]对 BDFM 的动态特性进行了分析,其中文献[7]主要研究了不同转子结构对动态特性的影响,文献[8]则侧重于 BDFM 启动特性的研究。控制策略也是 BDFM 研究的一个热点:其中文献[9-11]分别对 BDFM 的直接转矩控制、矢量控制和模糊控制进行了详细介绍,文献[12-14]通过分析得出 BDFM 稳态运行时具有类似同步电机的功角特性,同时指出改变控制绕组电压的大小可以调节 BDFM 的稳定运行范围和功率因数;文献[15]通过频率折算,建立了 BDFM 的等效电路,给出了稳态运行时有功功率和转矩的表达式。现有文献对 BDFM 稳态特性的研究主要侧重于功角特性、功率因数特性等方面,且分析方法十分复杂,对其他诸如有功、无功调节特性和 V 形曲线等方面并没有进行分析。

为了寻求一种简捷且对各种稳态特性都能进行分析的普遍方法,在前人研究的基础上,从笼型转子 BDFM 的耦合电路和基本方程式出发,分析并得到了 BDFM 电流、有功功率、无功功率、电磁转矩和功率因数的数学模型,通过仿真研究了控制绕组电压、频率和功角对 BDFM 矩角特性、矩频特性、功角特性、无功特性、功率因数特性和 V 形曲线等稳态特性的影响;同时还提出了一个简化的有功功率表达式,进而分析了 BDFM 的能量转换关系。

1 BDFM 的耦合电路及电压方程式

设功率绕组和控制绕组磁场转速分别为 n_p 和 n_c ,则有

$$\left. \begin{aligned} n_p &= 60f_p/p_p \\ n_c &= 60f_c/p_c \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中 f_p 、 p_p 和 f_c 、 p_c 分别为功率绕组和控制绕组的频率与极对数。

当 BDFM 稳定运行时,转子转速为^[3-4,7-8,15]

$$n_r = 60(f_p - f_c)/(p_p + p_c). \quad (2)$$

当 $f_c > 0$ 、 $f_c < 0$ 和 $f_c = 0$ 时,BDFM 分别运行

于亚同步速、超同步速和自然同步速。式(2)表明,通过调节控制绕组频率的大小和正负,可以灵活调节 BDFM 的转速和运行状态。

转子相对于功率绕组磁场的转差率为

$$s_{rp} = f_r/f_p = (n_p - n_r)/n_p, \quad (3)$$

式中 f_r 为转子电流的频率。

同理,控制绕组磁场相对于转子的转差率、控制绕组磁场相对于功率绕组磁场的转差率分别为

$$s_{cr} = f_c/f_r, \quad (4)$$

$$s = f_c/f_p = s_{rp}s_{cr}. \quad (5)$$

联立求解式(1)~式(3),可得

$$s_{rp} = \frac{f_p p_c + f_c p_p}{f_p(p_p + p_c)}. \quad (6)$$

BDFM 定子上有 2 套彼此独立的三相绕组,其中极对数为 p_p 的功率绕组直接与电压为 U_p 、频率为 f_p 的工频电源连接,极对数为 p_c 的控制绕组由变频电源供电,其电压 U_c 和频率 f_c 可调。定子功率绕组和控制绕组在理论上没有直接的电磁耦合,而是通过转子的磁场调制作用来实现机电能量的转换^[4,7]。经频率折算后,笼型转子 BDFM 的稳态耦合电路如图 1 所示^[15]。

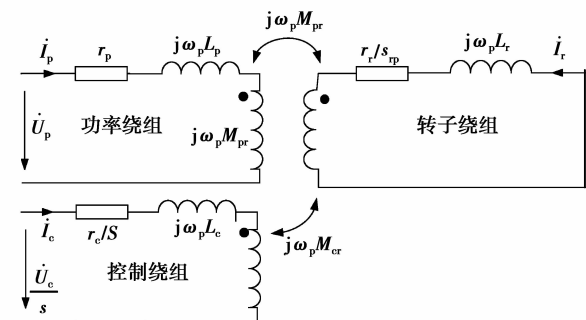


图 1 BDFM 的耦合电路

设功率绕组和控制绕组的电压、电流均按照电动机惯例进行定义。根据耦合电路中参考方向的规定,可得到 BDFM 的稳态电压平衡方程式

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_p &= (r_p + j\omega_p L_p)\dot{I}_p + j\omega_p M_{pr}\dot{I}_r \\ \frac{\dot{U}_c}{s} &= \left(\frac{r_c}{s} + j\omega_p L_c\right)\dot{I}_c + j\omega_p M_{cr}\dot{I}_r \\ 0 &= j\omega_p M_{pr}\dot{I}_p + j\omega_p M_{cr}\dot{I}_c + \left(\frac{r_r}{s_{rp}} + j\omega_p L_r\right)\dot{I}_r \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

式中: \dot{I}_p 、 \dot{I}_c 、 \dot{I}_r 分别为功率绕组、控制绕组和转子电流; r_p 、 r_c 、 r_r 和 L_p 、 L_c 、 L_r 分别为功率绕组、控制绕组、转子的电阻和自感; M_{pr} 和 M_{cr} 分别为功率绕组和控制绕组与转子之间的互感; ω_p 为功率绕组的角频率。

2 BDFM 稳态特性的数学模型

2.1 电流计算模型

以 \dot{U}_p 作为参考向量,令其初相角为 0。设 \dot{U}_c 滞后 \dot{U}_p 的角度为 α ,并定义为 BDFM 的功角。这时,将式(7)分解为实部和虚部,可得^[15]

$$\left. \begin{aligned} r_p I_{pr} - \omega_p L_p I_{pi} - \omega_p M_{pr} I_{ri} - U_p &= 0 \\ r_p I_{pi} + \omega_p L_p I_{pr} + \omega_p M_{pr} I_{rr} &= 0 \\ \frac{r_c}{s} I_{cr} - \omega_p L_c I_{ci} - \omega_p M_{cr} I_{ri} - \frac{U_c}{s} \cos \alpha &= 0 \\ \frac{r_c}{s} I_{ci} + \omega_p L_c I_{cr} + \omega_p M_{cr} I_{rr} + \frac{U_c}{s} \sin \alpha &= 0 \\ \omega_p M_{pr} I_{pi} + \omega_p M_{cr} I_{ci} - \frac{r_r}{s_{rp}} I_{rr} + \omega_p L_r I_{ri} &= 0 \\ \omega_p M_{pr} I_{pr} + \omega_p M_{cr} I_{cr} + \frac{r_r}{s_{rp}} I_{ri} + \omega_p L_r I_{rr} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

式中: I_{pr} 、 I_{pi} 、 I_{cr} 、 I_{ci} 、 I_{rr} 、 I_{ri} 分别为 I_p 、 I_c 、 I_r 的实部和虚部。

以 I_{pr} 、 I_{pi} 、 I_{cr} 、 I_{ci} 、 I_{rr} 、 I_{ri} 作为未知量,联立求解式(5)、(6)和(8),可得

$$\{\mathbf{I}\} = \mathbf{f}(U_c, f_c, \alpha), \quad (9)$$

式中: $\{\mathbf{I}\}$ 表示由各电流分量组成的集合, \mathbf{f} 表示由相应的函数所组成的集合,二者均为广义变量。

式(9)描述了 BDFM 各电流分量随 U_c 、 f_c 和 α 变化的数学模型,是一组非线性方程。在 BDFM 电阻、电感参数和功率绕组电压、频率已知,只要给出了控制绕组电压的大小、频率、相位、相序,就可求出所有的电流分量,进而求出功率、转矩、功率因数等。

2.2 功率计算模型

由图 1 可知,三相功率绕组的有功功率为

$$P_p = 3\text{Re}[\dot{U}_p \dot{I}_p^*] = 3r_p I_p^2 + 3\text{Re}[j\omega_p M_{pr} \dot{I}_r \dot{I}_p^*], \quad (10)$$

式中:第 1 项为功率绕组的铜耗,第 2 项为功率绕组传递给转子的有功功率,记为 P_{pr} 。

结合式(9),可得

$$P_{pr} = 3\text{Re}[j\omega_p M_{pr} \dot{I}_r \dot{I}_p^*] = f(U_c, f_c, \alpha). \quad (11)$$

同理,功率绕组的无功功率和传递给转子的无功功率,控制绕组传递给转子的有功功率和无功功率分别为

$$Q_p = 3\text{Im}[\dot{U}_p \dot{I}_p^*] = f(U_c, f_c, \alpha), \quad (12)$$

$$Q_{pr} = 3\text{Im}[j\omega_p M_{pr} \dot{I}_r \dot{I}_p^*] = f(U_c, f_c, \alpha), \quad (13)$$

$$P_{cr} = 3s\text{Re}[j\omega_p M_{cr} \dot{I}_r \dot{I}_c^*] = f(U_c, f_c, \alpha), \quad (14)$$

$$Q_{cr} = 3s\text{Im}[j\omega_p M_{cr} \dot{I}_r \dot{I}_c^*] = f(U_c, f_c, \alpha). \quad (15)$$

电磁功率 P_{em} 为

$$P_{em} = P_{pr} + P_{cr} = f(U_c, f_c, \alpha), \quad (16)$$

再结合式(8)和式(11)~(15),可得

$$3r_r I_r^2 = s_{rp}(P_{pr} + P_{cr}/s). \quad (17)$$

由式(17)可见,功率绕组和控制绕组传递给转子的有功功率中,有部分转变为转子铜耗,其余则转换成机械功率。若忽略转子电阻,则式(17)可简化为

$$P_{pr} = -P_{cr}/s. \quad (18)$$

由式(18)可见,控制绕组传递给转子的有功功率,为功率绕组传递给转子的有功功率的 s 倍。也就是说,控制绕组作为 BDFM 的副绕组,只需承担转差功率。

2.3 电磁转矩计算模型

设功率绕组和控制绕组产生的电磁转矩分别为 T_p 和 T_c ,由式(9)、式(11)和式(14),可得 BDFM 的总电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_{em} = T_p + T_c &= \frac{P_{pr}}{\omega_p/p_p} + \frac{P_{cr}}{|\omega_c|/p_c} = \\ &= 3p_p M_{pr} \text{Re}[j\dot{I}_r \dot{I}_p^*] \pm 3p_c M_{cr} \text{Re}[j\dot{I}_r \dot{I}_c^*] = \\ &= f(U_c, f_c, \alpha). \end{aligned} \quad (19)$$

式中,当 BDFM 运行于亚同步状态时,取“+”;超同步状态时,取“-”。

由式(19)可见, I_r 、 I_p 相互作用产生电磁转矩 T_p , I_r 、 I_c 相互作用产生电磁转矩 T_c , T_p 、 T_c 共同构成 BDFM 的电磁转矩 T_{em} 。

设电机负载转矩为 T_L ,若忽略摩擦转矩,由稳态转矩平衡方程为

$$T_{em} - T_L = 0. \quad (20)$$

2.4 功率绕组电流和功率因数计算模型

根据式(9),可计算得到功率绕组的电流为

$$I_p = \pm \sqrt{I_{pi}^2 + I_{pr}^2} = f(U_c, f_c, \alpha), \quad (21)$$

式中,电动状态时取“+”,发电状态时取“-”。

功率绕组的功率因数为

$$\cos \varphi = \cos [tg^{-1}(I_{pi}/I_{pr})] = f(U_c, f_c, \alpha). \quad (22)$$

3 仿真实例及其分析

为了验证提出的数学模型,在 Matlab 平台上利用符号计算功能,编制计算程序对一台 4.5 kW 的笼型转子 BDFM 稳态特性进行仿真。仿真中所用样机的参数为: $U_p = 220$ V, $f_p = 50$ Hz, $p_p = 3$, $p_c = 1$, $r_p = 4.03$ Ω , $L_p = 0.3225$ H, $r_c = 2.06$ Ω , $L_c = 0.4818$ H, $r_r = 0.315$ m Ω , $L_r = 0.0315$ mH, $M_{pr} = 1.3589$ mH, $M_{cr} = 4.6704$ mH。

3.1 转矩特性分析

由式(19)可知, T_{em} 是一个关于 U_c 、 f_c 、 α 的函

数。当 f_c 一定时, T_{em} 随 U_c 、 α 变化的矩角特性曲线如图 2 所示。

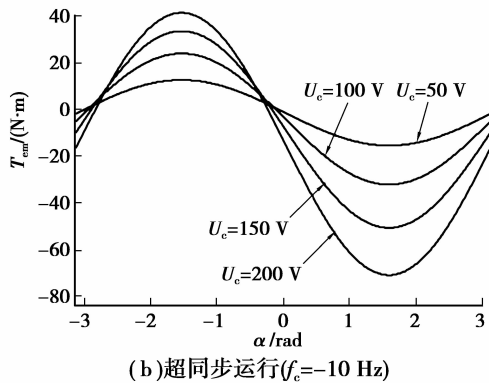
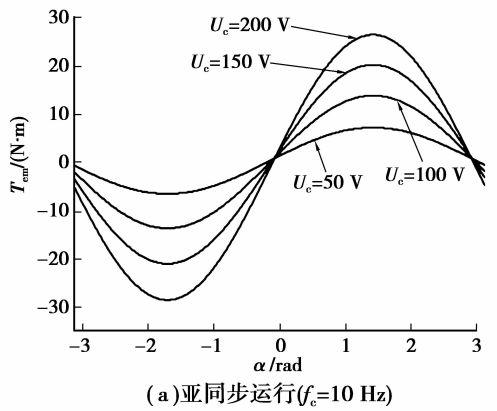


图 2 $f_c = \pm 10$ Hz 时的矩角特性曲线

可见, BDFM 与同步电机具有类似的矩角特性。同步电机的稳定运行条件为 $dT_{em}/d\alpha > 0$, 因此 BDFM 的稳定性判据依然为 $dT_{em}/d\alpha > 0$ 。在 f_c 一定的情况下, 适当提高 BDFM 控制绕组电压的大小, 可提高 BDFM 的稳定性, 这与文献[12-14] 得到的结论一致。

保持 $U_c = 50$ V 不变, T_{em} 随 f_c 、 α 变化的矩角特性曲线如图 3 所示。

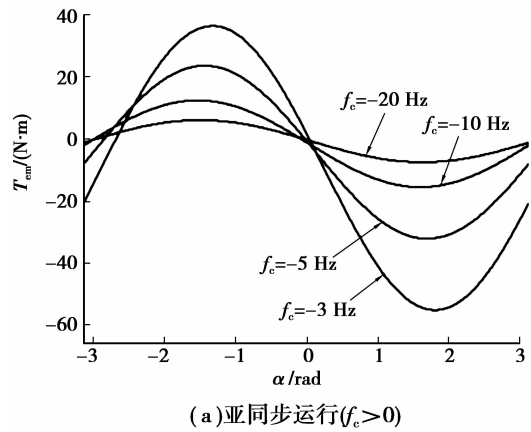
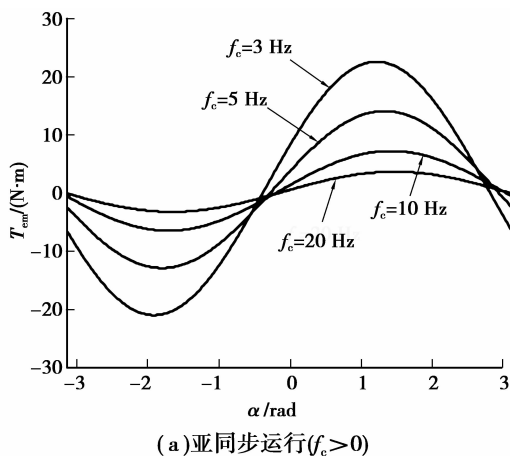


图 3 $U_c = 50$ V 时的矩角特性曲线

可见, 当 f_c 越接近 0 时, BDFM 稳定运行的转矩范围越大, 说明 BDFM 在自然同步速附近运行时具有较好的稳定性。

保持 $U_c = 50$ V、 $\alpha = \pi/6$ 不变, T_{em} 随 f_c 变化的矩频特性曲线如图 4 所示。

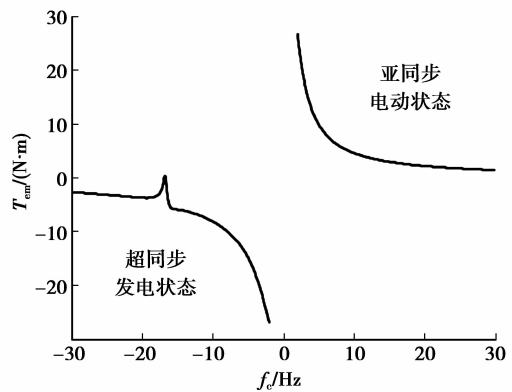


图 4 矩频特性曲线

可见, 当 $f_c = -f_p p_c / p_p = -50/3$ Hz 时, 矩频特性曲线出现了一个尖点, BDFM 不能稳定运行。这是因为, 由式(1)和式(2)可知, 此时功率绕组和控制绕组磁场转向相同, 且有 $n_p = |n_c| = n_r$, 即定子功率绕组、控制绕组产生的磁场与转子保持相对静止, 转子中不感应电动势, 无电流, 不能产生电磁转矩, 故不能稳定运行, BDFM 应尽量避免运行于该点。此外, 在 U_c 、 α 一定的情况下, $|T_{em}|$ 随 $|f_c|$ 的减小而增大, 当 $f_c = 0$ 时, 由式(5)可知 $s = 0$, 而由图 1 可知耦合电路不适用于 $s = 0$ 的情况, 故此时不能直接计算 T_{em} , 因而对于自然同步速情况需另外进行考虑。

3.2 有功功率分析

由式(11)、式(14)和式(16)可知, P_{pr} 、 P_{cr} 、 P_{em} 都是关于 U_c 、 f_c 、 α 的函数。保持 $U_c = 50$ V 不变, 当

f_c 一定时, P_{pr} 、 P_{cr} 、 P_{em} 随 α 变化的功角特性曲线如图 5 所示。

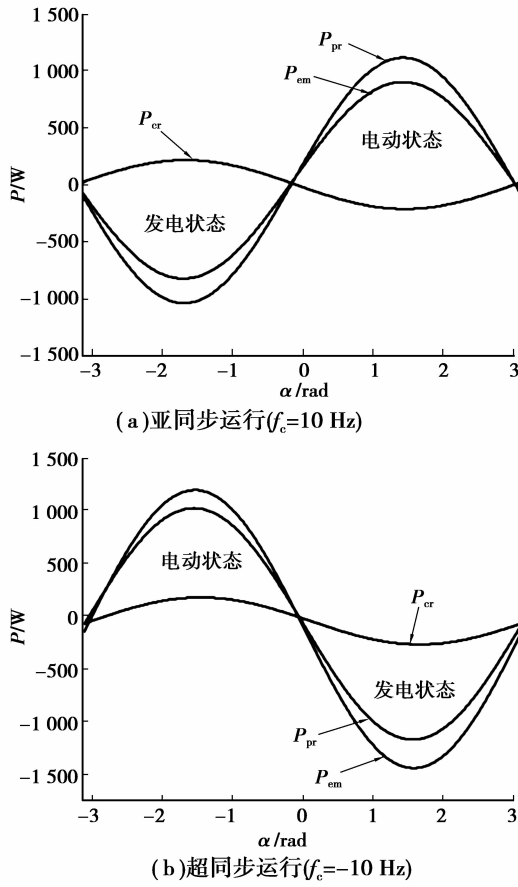


图 5 功角特性曲线

可见,当 BDFM 运行于亚同步速时,功率绕组和控制绕组传递给转子的有功功率流向相反;而当 BDFM 运行于超同步速时,则两者的功率流向相同。

3.3 功率流向分析

为了进一步对功率流向进行分析,根据式(11),忽略定、转子电阻,经推导可得出功率绕组传递给转子的有功功率简化表达式为

$$P_{pr} = -\frac{M_{cr}M_{pr}U_cU_p \sin \alpha}{2\pi f_c(L_cL_pL_r - L_cM_{pr}^2 - L_pM_{cr}^2)}, \quad (23)$$

式中: $L_cL_pL_r - L_cM_{pr}^2 - L_pM_{cr}^2$ 决定于 BDFM 的电感参数,有 $L_cL_pL_r - L_cM_{pr}^2 - L_pM_{cr}^2 < 0$;控制绕组电压的幅值 U_c 恒大于 0,故有 $M_{cr}M_{pr}U_cU_p > 0$ 。

利用式(5)、(16)、(18)、(23)对各种运行状态下的功率流向进行具体分析。

由式(23)可知,当 $f_c > 0, 0 < \alpha < \pi$ 时, $P_{pr} > 0$, BDFM 运行于亚同步电动状态。另外,通常情况下有 $|s| < 1$,由式(5)和式(18)可知, $P_{cr} < 0$ 且 $P_{pr} > |P_{cr}|$,故由式(16)可知 $P_{em} > 0$ 。基于以上分析,可画出 BDFM 亚同步电动状态下的功率流向,如图 6(a)

所示。该状态对应于图 4 的右上方区域以及图 5(a) 的右边区域。

同理分析可知,当 $f_c < 0, 0 < \alpha < \pi$ 时, $P_{pr} < 0, P_{cr} < 0$ 和 $P_{em} < 0$, BDFM 运行于超同步发电状态,其功率流向如图 6(b)所示。该状态对应于图 4 的左下方区域以及图 5(b)的右边区域。

当 $f_c > 0, -\pi < \alpha < 0$ 时, $P_{pr} < 0, P_{cr} > 0$ 和 $P_{em} < 0$, BDFM 运行于亚同步发电状态,其功率流向如图 6(c)所示。该状态对应于图 5(a)的左边区域。

当 $f_c < 0, -\pi < \alpha < 0$ 时, $P_{pr} > 0, P_{cr} > 0$ 和 $P_{em} > 0$, BDFM 运行于超同步电动状态,其功率流向如图 6(d)所示。该状态对应于图 5(b)的左边区域。

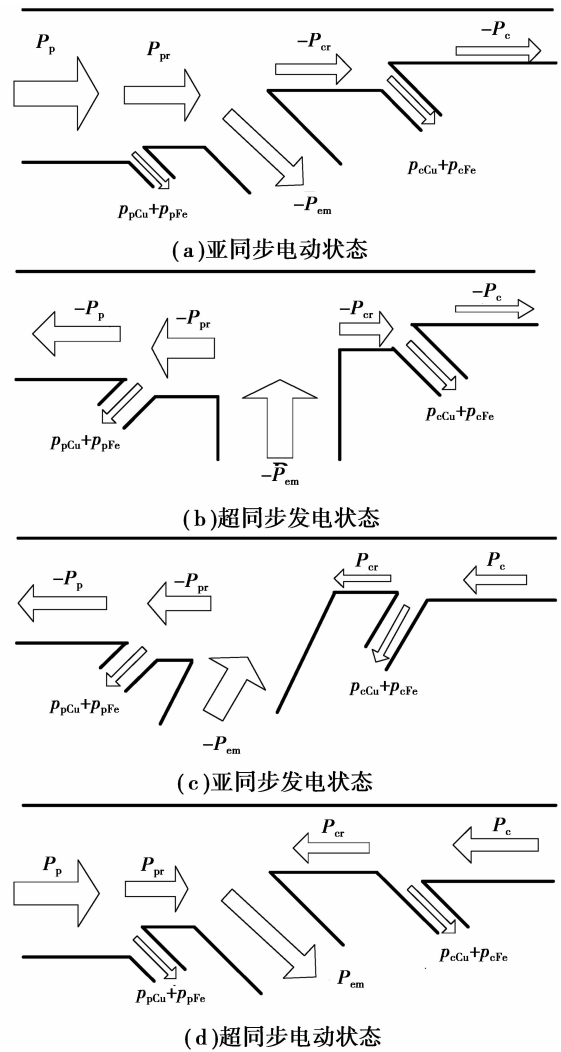


图 6 BDFM 的能量转换

综合图 5 和图 6 可见,忽略定转子电阻后所获得的简化功率解析表达式(23)可方便地分析 BDFM 的功率流向,其结果与文献[17]一致。

3.4 无功功率分析

由式(12)可知, Q_p 是一个关于 U_c 、 f_c 、 α 的函数。当 f_c 一定时, Q_p 随 U_c 、 α 变化的无功功率特性曲线如图 7 所示。

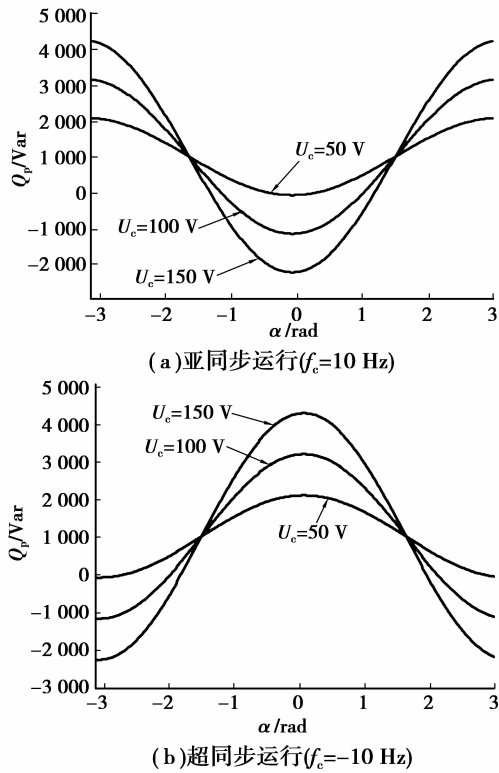


图 7 无功功率特性曲线

可见, 通过调节控制绕组电压的大小、频率、相位和相序, 可以灵活地调节功率绕组无功功率的大小及流向, 进而调节功率绕组的功率因数。

3.5 功率因数分析

为了进一步分析功率因数的变化规律, 以恒转矩负载运行工况为例, 结合式(19)、式(20)和式(22)可知, 功率因数是一个关于 U_c 、 f_c 、 T_L 的函数。在亚同步运行时, 通过仿真得到的功率因数特性曲线如图 8 所示。

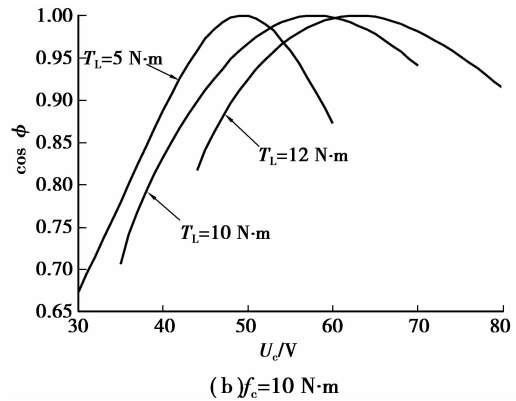
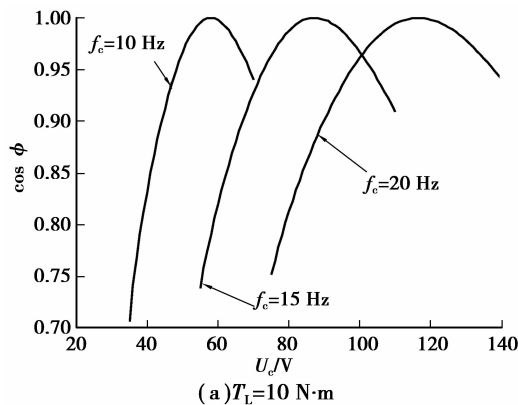


图 8 功率因数特性曲线

可见, 适当增加 U_c , 可以增加功率绕组的功率因数, 但当 U_c 过大时, 功率因数将减小, 其结果与文献[16-17]的实验数据变化规律一致。此外, 由图 8(a)可见, 保持 $T_L=10\text{ N}\cdot\text{m}$ 不变, 随着 f_c 的增加, 使功率因数达到 1 的 U_c 会相应增大; 由图 8(b)可见, 保持 $f_c=10\text{ Hz}$ 不变, 随着 T_L 的增加, 使功率因数达到 1 的 U_c 也会相应增大。

3.6 V形曲线分析

在恒转矩负载运行工况下, 结合式(19)~(21)可知, 此时功率绕组电流也是一个关于 U_c 、 f_c 、 T_L 的函数。在亚同步运行时, 通过仿真得到的曲线如图 9 所示。

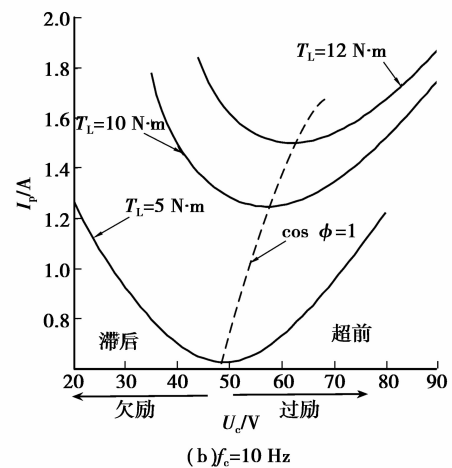
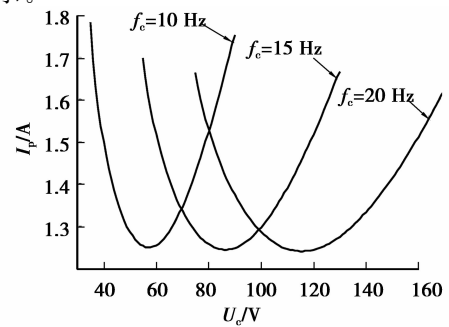


图 9 V形曲线

可见,当 f_c 和 T_L 一定时,随着 U_c 的增加, I_p 先减小后增大,呈“V”形变化,称之为 BDFM 的 V 形曲线,其仿真结果与文献[16] 的实验数据变化规律一致。参照同步电机 V 形曲线分析方法,结合图 8 和图 9 可看出,在功率因数达到 1 之前,BDFM 处于“欠励”状态,从电网吸收滞后的无功功率;而当 U_c 继续增大,BDFM 便处于“过励”状态,此时从电网吸收超前的无功功率。同时,由图 9(a)可见,保持 $T_L = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 不变,随着 f_c 的增加,V 形曲线向右移动;由图 9(b)可见,保持 $f_c = 10 \text{ Hz}$ 不变,随着 T_L 的增加,V 形曲线向右上方移动。

4 结 论

1)通过理论分析和公式推导,得出笼型转子 BDFM 的各种稳态特性均可表示为控制绕组电压 U_c 、频率 f_c 和功角 α 3 个变量的函数,所提出的数学模型简化了 BDFM 稳态特性的分析方法。

2)通过仿真研究,较为系统而全面地给出了笼型转子 BDFM 的矩角特性、矩频特性、功角特性、无功特性、功率因数特性和 V 形曲线等稳态特性曲线,通过与相关文献数据的比较,验证了文中模型与计算的正确性,为进一步研究 BDFM 的稳定性和控制策略奠定了基础。

3)提出了功率绕组传递给转子的有功功率简化表达式,利用该公式可以简化 BDFM 功率流向的分析方法。

参考文献:

- [1] McMahan R A, Roberts P C, Wang X, et al. Performance of BDFM as generator and motor[J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 2006, 153(2):289-299.
- [2] Abdi E, Wang X Y, Shao S Y, et al. Performance characterization of brushless doubly-fed generator[C] // Proceedings of the 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 5-9, 2008, Edmonton, Alta, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [3] Williamson S, Ferreira A C, Wallace A K. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. I. analysis [J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 1997, 144(2):111-122.
- [4] 邓先明,姜建国.无刷双馈电机的工作原理及电磁设计[J].中国电机工程学报,2003,23(11):126-132. DENG Xianming, JIANG Jianguo. The principle and electromagnetic design of brushless doubly-fed machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11):126-132.
- [5] Poza J, Oyarbide E, Roye D, et al. Stability analysis of a BDFM under open-loop voltage control [C] // Proceedings of the 2005 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, Dresden, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2005:1-10.
- [6] Sarasola I, Poza J, Oyarbide E, et al. Stability analysis of a brushless doubly-fed machine under closed loop scalar current control[C] // Proceedings of the 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, November 6-10, 2006, Paris, France. Piscataway: IEEE Press, 2006:1527-1532.
- [7] 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):6-11,17. HAN Li, GAO Qiang, LUO Ciyong, et al. Comparison on the performance of brushless doubly-fed machine with different rotor structures[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(3):6-11, 17.
- [8] 邓先明,张海忠,拾华杰.笼形转子无刷双馈电机启动特性分析[J].电机与控制学报,2008,12(5):545-549. DENG Xianming, ZHANG Haizhong, SHI Huajie. Analysis of starting characteristics of cage-rotor brushless doubly-fed machine[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5):545-549.
- [9] Sarasola I, Poza J, Rodriguez M A, et al. Predictive direct torque control for brushless doubly fed machine with reduced torque ripple at constant switching frequency [C] // Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 4-7, 2007, Vigo, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1074-1079.
- [10] Shao S Y, Abdi E, McMahan R. Vector control of the brushless doubly-fed machine for wind power generation[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, November 24-27, 2008, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2008:322-327.
- [11] Wang Q, Chen X H, Ji Y C. Fuzzy-based active and reactive control for brushless doubly-fed wind power generation system[C] // Proceedings of the 2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, December 4-7, 2006, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2006:848-851.
- [12] Williamson S, Ferreira A C. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. part2: model verification and performance[J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 1997, 144(2):123-129.

- ZHAO Zhilong, WU Weilin, WANG Wei. A low voltage ride through technology for direct-drive wind turbines under unbalanced voltage dips [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 87-91.
- [7] Mullane A, Lightbody G, Yacamini R. Wind-turbine fault ride-through enhancement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1929-1937.
- [8] 杨晓萍, 段先锋, 钟彦儒. 直驱永磁同步风电机组不对称故障穿越的研究 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2): 7-12.
- YANG Xiaoping, DUAN Xianfeng, ZHONG Yanru. Asymmetrical faults ride-through of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(2): 7-12.
- [9] 孙素娟, 赵紫龙, 陈玮. 电网不对称时直驱风电机组双电流环控制策略 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34(1): 41-45.
- SUN Sujuan, ZHAO Zhilong, CHEN Wei. Dual current-loop control strategy for converter of directly-driven wind generation under grid conditions [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2010, 34(1): 41-45.
- [10] 陈众, 颜伟, 徐国禹, 等. 基于直流侧电容电压弱控制策略的 UPFC 二阶段控制器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 49-53.
- CHEN Zhong, YAN Wei, XU Guoyu, et al. Design of UPFC Soft-complete controller based on the dc link capacitor voltage soft control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 49-53.
- [11] Yongsug S, LIPO T A. Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1530-1540.
- [12] Hong S S, Kwanghee N. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [13] Yazdania A, Iravani R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1620-1629.
- [14] 胡书举, 李建林, 许洪华. 适用于直驱式风电系统的 Crowbar 电路分析 [J]. 电力建设, 2007, 28(9): 44-47.
- HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis of crowbar circuits used in direct-drive WTG systems [J]. Electric Power Construction, 2007, 28(9): 44-47.
- [15] Nian H, Liu J, Zhou P, et al. Improved control strategy of an active crowbar for directly-driven PM wind generation system under grid voltage dips [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, 2008: 2294-2298.
- [16] Yuan X B, Wang F, Boroyevich D, et al. DC-link voltage control of a full power converter for wind generator operating in weak-grid systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(9): 2178-2192.

(编辑 侯湘)

(上接第 67 页)

- [13] 杨顺昌, 徐昌彪. 无刷双馈电机的稳态转矩-角特性 [J]. 电工技术学报, 1998, 13(4): 15-18.
- YANG Shunchang, XU Changbiao. Steady state torque angle characteristics of brushless doubly-fed machines [J]. Transactions of China electrotechnical Society, 1998, 13(4): 15-18.
- [14] 邓先明, 姜建国, 武小杰, 等. 笼型转子无刷双馈电机的无功功率和稳定性 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 40-47.
- DENG Xianming, JIANG Jianguo, WU Xiaojie, et al. Reactive power and stability of brushless doubly-fed machine with cage rotor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 40-47.
- [15] 杨向宇, 励庆孚. 无刷双馈调速电机稳态运行特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 14-17.
- YANG Xiangyu, LI Qingfu. Steady state performance of brushless doubly-fed machines for adjustable speed drives [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(4): 14-17.
- [16] 张爱玲, 熊光煜, 刘振富, 等. 无刷双馈电机能量传递关系和功率因数特性的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 92-97.
- ZHANG Ailing, XIONG Guangyu, LIU Zhenfu, et al. Experimental study on energy transmission and power factor characteristics of brushless doubly-fed machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 92-97.
- [17] 邓先明. 无刷双馈电机的电磁分析与设计应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

(编辑 詹燕平)