

移 15° 双十二相隐极同步整流发电机 数学模型的研究*

侯少波, 欧阳斌, 苏 武

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 分别在 abc 坐标系和 dq0 坐标系下建立了移 15° 双十二相隐极同步整流发电机的基本数学方程, 推导了电机电压、磁链、输出功率、电磁转矩和转子运动方程。在 MATLAB/Simulink 中建立了移 15° 双十二相隐极同步整流发电机的仿真模型。对两路输出进行了不平衡负载仿真和试验。仿真与试验结果相比基本一致, 验证了移 15° 双十二相隐极同步整流发电机数学模型的正确性。这为双十二相同步整流发电机运行性能和励磁控制系统的研究奠定了基础。

关键词: 双十二相隐极同步整流发电机; 数学方程; 仿真模型; 不平衡负载

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)02-0057-09

Research on the Mathematical Model of 15° Shifted Dual Twelve-Phase Non-Salient Pole Synchronous Rectifier Generator*

HOU Shaobo, OUYANG Bin, SU Wu

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The basic mathematical equations of the 15° shifted dual twelve-phase non-salient pole synchronous rectifier generator were established in the abc and dq0 coordinate systems respectively, and the motor voltage, flux linkage, output power, electromagnetic torque and rotor motion equation were derived. The simulation model of 15° shifted dual twelve-phase non-salient pole synchronous rectifier generator was set up in MATLAB/Simulink. The unbalanced load simulation and test were carried out on the two outputs, and the correctness of the mathematical model of the double twelve-phase non-salient synchronous rectifier generator was verified by the basically consistent results of simulation and test. A foundation for the research on the operation performance and excitation control system of the dual twelve-phase non-salient pole synchronous rectifier generator was laid.

Key words: double twelve-phase non-salient pole synchronous rectifier generator; mathematical equation; simulation model; unbalanced load

0 引 言

在飞机、船舶、电厂、电力机车等工业应用中, 需要容量大、供电品质高的直流电源^[1], 特别是在舰船综合电力系统领域, 对直流电源供电品质要

求更高, 三相电机难以满足舰船电力系统的实际需求。多相电机由于转矩密度大、转矩脉动小和可靠性高等优势^[2-8]得到了大量研究者的青睐。目前, 研究较多的有六相电机^[9-10]、九相电机^[11]、十二相电机^[12-13]、十五相电机^[14-15]等。上述多相

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51407190, 51707201, 51690181)

作者简介: 侯少波(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高速整流发电机。

欧阳斌(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力集成与电磁发射技术。

苏 武(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为高速发电机电磁场。

电机的理论研究有效地促进了多相电机的应用推广。

随着对舰船电力负载功率需求的持续增加,变换器的总容量不断增大,器件级的串并和单元设备层面的级并联等拓扑结构也在持续发展^[16],因此利用多套多相直流电源为大容量电能变换器提供可靠供电的需求显得尤为迫切。目前,三/十二相双绕组电机^[17-18]、双六相电机^[19]和双九相同步电机^[20]已成功应用于舰船的独立移动供电系统。对双十二相同步发电机的相关研究较少。基于应用需求,本课题组确定了双十二相绕组布置方案,研发出了双十二相隐极同步整流发电机。该电机具有输出特性相同、电气隔离的2个直流输出端,能够向舰艇左右舷负载同时提供直流电源。

为了对双十二相同步整流发电机进行深入研究,本文首先推导了双十二相隐极同步整流发电机的数学模型。然后利用 MATLAB/Simulink 软件,建立了双十二相隐极同步整流发电机的仿真模型,完成系统仿真,最后以双十二相隐极同步整流发电机样机为对象,对两路输出进行了不平衡负载试验。

转子轴线与定子相绕组轴线的相对位置如图1所示。每套十二相绕组中的每个三相绕组中点独立且不引出。

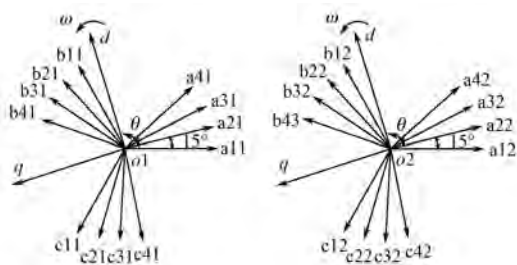


图1 转子轴线与定子相绕组轴线的相对位置

定子绕组接线示意图如图2所示。该双十二相绕组可以理解成是由每相绕组并联支路数为4

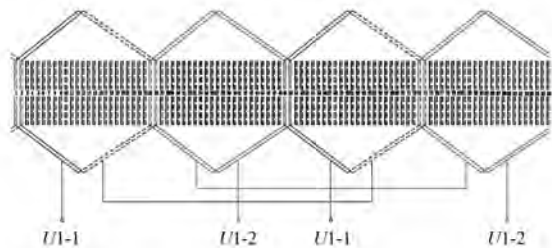


图2 定子绕组接线示意图

的十二相绕组拆分成两路输出,形成双十二相绕组,两套十二相绕组完全相同,每相并联支路数为2,两套绕组对应的Y绕组相位相同。

1 绕组布置概述

本文所研究的双十二相同步发电机定子上布置有两套绕组,均为十二相四Y移15°结构。第一套绕组用 a_{i1} 、 b_{i1} 、 c_{i1} ($i=1,2,3,4$) 分别表示其4个三相绕组,第二套绕组用 a_{i2} 、 b_{i2} 、 c_{i2} ($i=1,2,3,4$) 分别表示其4个三相绕组。

2 基本数学方程

2.1 abc 系统的基本方程

为了更好地理解双十二相隐极同步整流发电机的物理本质,本文先通过在 abc 坐标系下建立数学模型来分析其内部绕组的结构和关系。基本假设采用的是常见的电机假设和电动机正向规定惯例^[21];发电机转子上除了直轴阻尼绕组(k_d)、交轴阻尼绕组(k_q)、励磁绕组(f_d)外,还布置了一套交轴稳定绕组(f_q),用于改善系统的稳定性。

为了分析简便,采用“ x_{ad} ”基值系统,且各量均以标么值表示。由于两套十二相绕组完全相同,将两套绕组的参数用相同的符号表示:

$$\begin{aligned} \psi_{abc} = & [\psi_{a11}, \psi_{b11}, \psi_{c11}, \psi_{a12}, \psi_{b12}, \psi_{c12}, \psi_{a13}, \psi_{b13}, \psi_{c13}, \\ & \psi_{a14}, \psi_{b14}, \psi_{c14}, \psi_{a21}, \psi_{b21}, \psi_{c21}, \psi_{a22}, \psi_{b22}, \psi_{c22}, \\ & \psi_{a23}, \psi_{b23}, \psi_{c23}, \psi_{a24}, \psi_{b24}, \psi_{c24}, \psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_{fq}, \psi_{kq}]^T, \\ i_{abc} = & [i_{a11}, i_{b11}, i_{c11}, i_{a12}, i_{b12}, i_{c12}, i_{a13}, i_{b13}, i_{c13}, i_{a14}, \\ & i_{b14}, i_{c14}, i_{a21}, i_{b21}, i_{c21}, i_{a22}, i_{b22}, i_{c22}, i_{a23}, i_{b23}, \\ & i_{c23}, i_{a24}, i_{b24}, i_{c24}, i_{fd}, i_{kd}, i_{fq}, i_{kq}]^T. \end{aligned}$$

ψ_{abc} 、 i_{abc} 为 abc 坐标系中电机的磁链、电流向量,其维数是 28,前 24 维为定子相绕组量,后四维分别为励磁绕组、直轴阻尼绕组、交轴稳定绕组和交轴阻尼绕组的相关量。

令 $u_{kd} = u_{kq} = 0$, $u_{fq} = 0$ (交轴稳定绕组 f_q 短路),得到 abc 坐标系中双十二相的电机的磁链方程与电压方程为

$$\psi_{abc} = X_{abc} i_{abc} \quad (1)$$

$$u_{abc} = p\psi_{abc} - R_{abc} i_{abc} \quad (2)$$

其中: X_{abc} 为 abc 坐标系中的电感矩阵,为 28 阶方阵; p 为对时间求导的算子。

尼绕组在轴线重合时的互感电抗;

x_{afq} ——定子每相绕组与转子交轴稳定绕组在轴线重合时的互感电抗;

x_{akq} ——定子每相绕组与转子等效交轴阻尼绕组在轴线重合时的互感电抗。

以上各物理量均以标么值表示。

2.2 dq0 系统的基本方程

在第 2.1 节的数学方程中,电感参数由转子的位置角决定。为了使其表达形式更为简单,可将第 2.1 节的方程变换至 dq0 坐标系。

将三相电机的 Park 变换应用于式 (1) 和式 (2) 的坐标变换,变换矩阵取为

$$\mathbf{C}_{dq0}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & & & & & & & \\ & \mathbf{C}_{22} & & & & & & \\ & & \mathbf{C}_{33} & & & & & \\ & & & \mathbf{C}_{44} & & & & \\ & & & & \mathbf{C}_{11} & & & \\ & & & & & \mathbf{C}_{22} & & \\ & & & & & & \mathbf{C}_{33} & \\ & & & & & & & \mathbf{C}_{44} \\ & & & & & & & & \mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{C}_{ii} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos[\theta - (i-1)15^\circ] & \cos[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & \cos[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] \\ -\sin[\theta - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix},$$

$i=1,2,3,4$; $\mathbf{E}$ 为 4×4 的单位矩阵。 $\mathbf{C}_{dq0}^{abc}(\theta)$ 的逆矩阵为 $\mathbf{C}_{abc}^{dq0}(\theta)$:

$$\mathbf{C}_{abc}^{dq0} = [\mathbf{C}_{dq0}^{abc}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11}^{-1} & & & & & & & \\ & \mathbf{C}_{22}^{-1} & & & & & & \\ & & \mathbf{C}_{33}^{-1} & & & & & \\ & & & \mathbf{C}_{44}^{-1} & & & & \\ & & & & \mathbf{C}_{11}^{-1} & & & \\ & & & & & \mathbf{C}_{22}^{-1} & & \\ & & & & & & \mathbf{C}_{33}^{-1} & \\ & & & & & & & \mathbf{C}_{44}^{-1} \\ & & & & & & & & \mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\mathbf{C}_{ii}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos[\theta - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - (i-1)15^\circ] & 1 \\ \cos[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & 1 \\ \cos[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] & 1 \end{bmatrix}.$$

利用 Park 变换,可得 dq0 坐标系下的磁链方程和电压方程如下:

$$\boldsymbol{\psi}_{dq0} = \mathbf{X}_{dq0} \mathbf{i}_{dq0} \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_{dq0} = \mathbf{p} \boldsymbol{\psi}_{dq0} + \mathbf{A} \boldsymbol{\psi}_{dq0} \mathbf{p} - \mathbf{R}_{dq0} \mathbf{i}_{dq0} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_{dq0} &= \mathbf{C}_{dq0}^{abc}(\theta) \boldsymbol{\psi}_{abc} = \\ &[\psi_{d11}, \psi_{q11}, \psi_{011}, \psi_{d12}, \psi_{q12}, \psi_{012}, \psi_{d13}, \psi_{q13}, \psi_{013}, \\ &\psi_{d14}, \psi_{q14}, \psi_{014}, \psi_{d21}, \psi_{q21}, \psi_{021}, \psi_{d22}, \psi_{q22}, \psi_{022}, \\ &\psi_{d23}, \psi_{q23}, \psi_{023}, \psi_{d24}, \psi_{q24}, \psi_{024}, \psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_{fq}, \psi_{kq}]^T; \\ \mathbf{i}_{dq0} &= \mathbf{C}_{dq0}^{abc}(\theta) \mathbf{i}_{abc} = \end{aligned}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & & & & & & & & & \\ & \mathbf{A}_{22} & & & & & & & & \\ & & \mathbf{A}_{33} & & & & & & & \\ & & & \mathbf{A}_{44} & & & & & & \\ & & & & \mathbf{A}_{11} & & & & & \\ & & & & & \mathbf{A}_{22} & & & & \\ & & & & & & \mathbf{A}_{33} & & & \\ & & & & & & & \mathbf{A}_{44} & & \\ & & & & & & & & & \mathbf{0} \end{bmatrix};$$

$\mathbf{0}$ 为 4×4 的零矩阵;

$$\mathbf{A}_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{u}_{dg0} = \mathbf{C}_{dg0}^{\text{abc}}(\theta) \mathbf{u}_{\text{abc}} =$$

$$\begin{bmatrix} u_{d11}, u_{q11}, u_{011}, u_{d12}, u_{q12}, u_{012}, u_{d13}, u_{q13}, u_{013}, \\ u_{d14}, u_{q14}, u_{014}, u_{d21}, u_{q21}, u_{021}, u_{d22}, u_{q22}, u_{022}, \\ u_{d23}, u_{q23}, u_{023}, u_{d24}, u_{q24}, u_{024}, u_{Id}, 0, 0, 0 \end{bmatrix}^T \circ$$

从 abc 坐标系变换到 dq0 坐标系,电阻矩阵

R_{abc} 不变:

$$\mathbf{R}_{da0} = \mathbf{R}_{abc} =$$

$$\text{diag}(r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, \\ r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, r_a, \\ r_a, r_a, -r_{fd}, -r_{kd}, -r_{fq}, -r_{kq}) \circ$$

$dq0$ 坐标系中的电感矩阵 X_{dq0} 为

$$X_{dq0} = C_{dq0}^{\text{abc}}(\theta) X_{\text{abc}} C_{\text{abc}}^{dq0}(\theta) =$$

$$\left[\begin{array}{cccccccc} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} & \mathbf{D}_{13} & \mathbf{D}_{14} & \mathbf{D}_{11_0} & \mathbf{D}_{12} & \mathbf{D}_{13} & \mathbf{D}_{14} & \mathbf{D}_{1r} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} & \mathbf{D}_{23} & \mathbf{D}_{24} & \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22_0} & \mathbf{D}_{23} & \mathbf{D}_{24} & \mathbf{D}_{2r} \\ \mathbf{D}_{31} & \mathbf{D}_{32} & \mathbf{D}_{33} & \mathbf{D}_{34} & \mathbf{D}_{31} & \mathbf{D}_{32} & \mathbf{D}_{33_0} & \mathbf{D}_{34} & \mathbf{D}_{3r} \\ \mathbf{D}_{41} & \mathbf{D}_{42} & \mathbf{D}_{43} & \mathbf{D}_{44} & \mathbf{D}_{41} & \mathbf{D}_{42} & \mathbf{D}_{43} & \mathbf{D}_{44_0} & \mathbf{D}_{4r} \\ \mathbf{D}_{11_0} & \mathbf{D}_{12} & \mathbf{D}_{13} & \mathbf{D}_{14} & \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} & \mathbf{D}_{13} & \mathbf{D}_{14} & \mathbf{D}_{1r} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22_0} & \mathbf{D}_{23} & \mathbf{D}_{24} & \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} & \mathbf{D}_{23} & \mathbf{D}_{24} & \mathbf{D}_{2r} \\ \mathbf{D}_{31} & \mathbf{D}_{32} & \mathbf{D}_{33_0} & \mathbf{D}_{34} & \mathbf{D}_{31} & \mathbf{D}_{32} & \mathbf{D}_{33} & \mathbf{D}_{34} & \mathbf{D}_{3r} \\ \mathbf{D}_{41} & \mathbf{D}_{42} & \mathbf{D}_{43} & \mathbf{D}_{44_0} & \mathbf{D}_{41} & \mathbf{D}_{42} & \mathbf{D}_{43} & \mathbf{D}_{44} & \mathbf{D}_{4r} \end{array} \right] \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{D}_{\ddot{u}} = \text{diag}(-x_{dy}, -x_{gy}, -x_{0y});$$

$$\mathbf{D}'_{ii} = \text{diag}(-x_{dy\ 0}, -x_{ay\ 0}, -x_{0y\ 0});$$

$$\mathbf{D}_{12} = \mathbf{D}_{23} = \mathbf{D}_{34} = \begin{bmatrix} -x_{dm1} & x_{dqm1} & 0 \\ -x_{dqm1} & -x_{qm1} & 0 \\ 0 & 0 & -x_{\rho m1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_{13} = \mathbf{D}_{24} = \begin{bmatrix} -x_{dm2} & x_{dqm2} & 0 \\ -x_{dqm2} & -x_{qm2} & 0 \\ 0 & 0 & -x_{0m2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_{14} = \begin{bmatrix} -x_{dm3} & x_{dqm3} & 0 \\ -x_{dqm3} & -x_{qm3} & 0 \\ 0 & 0 & -x_{\sigma m2} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_{\ddot{u}} = \mathbf{D}_{\ddot{u}}^T, (i, j = 1, 2, 3, 4);$$

$$\mathbf{D}_{ir} = \begin{bmatrix} x_{afdy} & x_{akdy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{afqy} & x_{akqy} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \odot$$

只考虑电机气隙基波磁场,以上阻抗矩阵中各量的表达式详见附录。

其中单 Y 绕组的参数用下标 y 表示, 相差 15° 、 30° 和 45° 电角度的两 Y 绕组间的互感参数分别用下标 m_1 、 m_2 和 m_3 表示, 漏电抗用下标 s 表示。 x_{0m1} 、 x_{0m2} 、 x_{0m3} 分别为相差 15° 、 30° 、 45° 的两 Y 绕组的零轴互感抗; x_{dqm1} 、 x_{dqm2} 、 x_{dqm3} 分别为相差 15° 、 30° 、 45° 的两 Y 绕组 d 、 q 轴之间的互感抗; x_{sm1} 、 x_{sm2} 、 x_{sm3} 分别为相差 15° 、 30° 、 45° 的两 Y 绕组的互漏感抗。

综合以上分析,在 $dq0$ 坐标系中描述双十二相同步发电机的最小参数集为

$$\{x_{d_v}, x_{a_v}, x_{0_v}, x_{d_v 0}, x_{a_v 0}, x_{0_v 0}, x_{dm1} (= x_{dm3}), x_{dm2},$$

$$\begin{aligned} & x_{qm1} (= x_{qm3}), x_{qm2}, x_{dqm1} (= x_{dqm3}), x_{dqm2} (= x_{0m2}), \\ & x_{0m1} (= -x_{0m3}), x_{afdy}, x_{akdy}, x_{afqy}, x_{akqy}, x_{fld}, x_{fldkd}, \\ & x_{kd}, x_{lq}, x_{lqkq}, x_{kq}, r_a, r_{ld}, r_{lq}, r_{kd}, r_{kq} \} \quad (10) \end{aligned}$$

由双十二相电机的最小参数集可知,不同Y绕组的d、q轴之间不解耦,即存在互感抗,但从这些互感抗的表达式可知,这些互感抗数值很小,属于互漏抗性质。对不引出中性点的十二相同步电机的暂态过程的数值计算表明,不考虑此耦合引起的误差较小,在工程上可以忽略。另一方面,零轴的电抗参数也属于漏抗性质,对不引出中性点的十二相同步电机也可不考虑。因此,不引出中性点的双十二相同步发电机的最小参数集可简化为

$$\begin{aligned} & \{ x_{dy}, x_{qy}, x_{0y}, x_{dy_0}, x_{qy_0}, x_{0y_0}, x_{dm1}, x_{dm2}, x_{qm1}, \\ & x_{qm2}, x_{dqm1}, x_{dqm2}, x_{0m1}, x_{afdy}, x_{akdy}, x_{afqy}, x_{akqy}, x_{fld}, \\ & x_{fldkd}, x_{kd}, x_{lq}, x_{lqkq}, x_{kq}, r_a, r_{ld}, r_{lq}, r_{kd}, r_{kq} \} \quad (11) \end{aligned}$$

2.3 输出功率、电磁转矩和转子运动方程

2.3.1 输出功率

取定子额定相电压的幅值作为电压瞬时值的基准值、额定相电流的幅值作为电流瞬时值的基准值: $u_b = \sqrt{2}U_N$, $i_b = \sqrt{2}I_N$ 。输出功率 P 用标么值表示,十二相功率基准值为

$$P_b = 12U_N I_N = 6u_b i_b \quad (12)$$

式中: U_N 、 I_N ——定子额定相电压、额定相电流。

可得双十二相输出功率标么值为

$$\begin{aligned} P &= 2 \times \frac{1}{6} \sum_{k=1}^4 (u_{ak} i_{ak} + u_{bk} i_{bk} + u_{ck} i_{ck}) = \\ & 2 \times \frac{1}{6} \times \frac{3}{2} \sum_{k=1}^4 (u_{dk} i_{dk} + u_{qk} i_{qk} + 2u_{0k} i_{0k}) = \\ & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^4 (i_{dk} p \psi_{dk} + i_{qk} p \psi_{qk} + 2i_{0k} p \psi_{0k}) + \\ & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) p \theta - \\ & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^4 (i_{dk}^2 + i_{qk}^2 + 2i_{0k}^2) r_a \quad (13) \end{aligned}$$

2.3.2 电磁转矩

电角度 θ 与电角速度 ω 、机械角速度 Ω 之间的关系为

$$\Omega = \frac{\omega}{p} = \frac{1}{p} \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{p} p\theta \quad (14)$$

电磁转矩 M 用标么值表示,并取基准值

$$M_b = \frac{P_b}{\Omega_b} = p \frac{P_b}{\omega_b} = 6pu_b i_b t_b = 6p\psi_b i_b \quad (15)$$

式中: p ——电机极对数;

Ω_b ——转子机械角速度基准值;

t_b ——时间基准值;

ω_b ——转子电角速度基准值。

故可得双十二相电机电磁转矩标么值为

$$\begin{aligned} M &= \frac{\text{跨气隙到达定子的功率}}{\text{转子机械角速度}} = \\ & \frac{2 \times \frac{3}{2} \sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) p \theta}{\Omega} \frac{1}{M_b} = \\ & \frac{3 \sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) p \theta}{\Omega} \frac{1}{6p\psi_b i_b} = \\ & \frac{3 \sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) p \theta}{6p\Omega\psi_b i_b} = \\ & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) \quad (16) \end{aligned}$$

2.3.3 转子运动方程

转子运动方程为

$$M_i - M = \frac{J}{p} \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (17)$$

式中: M_i ——输入机械转矩;

M ——电磁转矩;

J ——转动轴系的等效转动惯量。

3 仿真与试验验证

为了验证移 15° 双十二相隐极同步整流发电机数学模型的正确性,进行了仿真与试验验证。首先分别对一路为空载、另一路从空载增加到满载和一路为满载、另一路从空载增加到满载的两类工况进行了仿真,然后用双十二相隐极同步整流发电机样机作为试验对象,对上述两类工况进行了试验,最后对仿真结果与试验结果进行分析。

3.1 MATLAB 仿真

在 MATLAB/Simulink 中,建立了移 15° 双十二相隐极同步整流发电机的仿真模型,如图 3 所示。

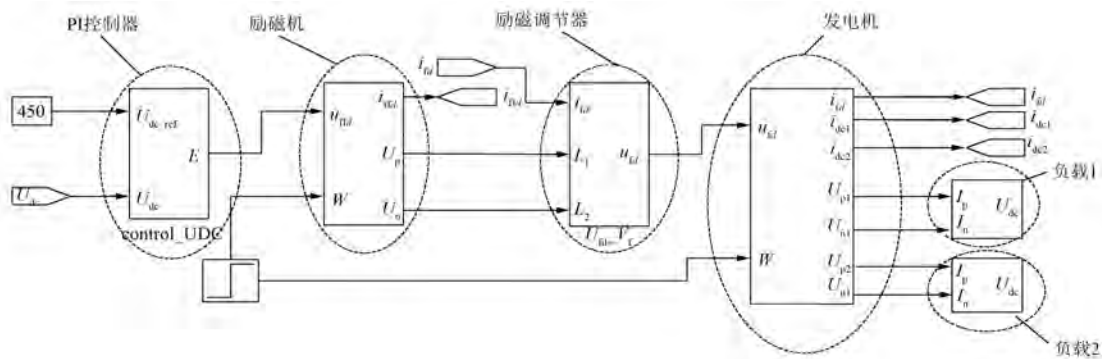


图3 双十二相同步整流发电机及其励磁系统仿真模型

为了验证上述双十二相隐极同步整流发电机数学模型的正确性,本课题组对该电机两路输出进行了不平衡负载的仿真。分别记录了不平衡负载情况下两路的交流侧线电压、直流侧输出电压、

直流侧输出电流。记录结果如表 1 所示,其中编号 1~6 工况为第 I 路升负载、第 II 路空载;编号 7~10 工况为第 I 路满载、第 II 路升负载。

表 1 仿真结果

编号	第 I 路输出			第 II 路输出			电压差	
	I_{dc1}/A	U_{dc1}/V	U_{ab1}/V	I_{dc2}/A	U_{dc2}/V	U_{ab2}/V	$\Delta U_{dc}/V$	$\Delta U_{ab}/V$
1	59	450.0	329.7	29	450.8	329.9	0.8	0.2
2	156	449.9	333.7	29	452.3	333.4	2.4	0.3
3	311	449.9	334.5	29	453.6	333.8	3.7	0.7
4	467	449.9	335.1	29	454.7	334.2	4.8	0.9
5	622	449.9	335.8	29	455.8	334.5	5.9	1.3
6	778	449.9	336.4	29	456.7	334.6	6.8	1.8
7	778	449.8	338.1	157	453.3	336.4	3.5	1.7
8	777	449.8	339.1	313	452.4	337.8	2.6	1.3
9	777	449.7	339.9	468	451.4	339.1	1.7	0.8
10	777	449.7	340.8	623	450.5	340.5	0.8	0.3

由表 1 可知,当两路输出不平衡负载时,交流侧线电压差以及直流电压差都随不平衡度的变化呈现单调变化规律。即使在两路负载分别为空载和满载时,线电压差和直流电压差均在 20 V 以内,满足设计要求。

3.2 某型双十二相隐极同步发电机试验验证

为进一步验证所建模型的有效性,在实验室的双十二相隐极同步整流发电机样机上进行了试验验证。图 4 所示为试验现场照片。

根据仿真结果,对于两路输出进行不平衡负载试验。分别记录不平衡负载情况下两路的交流侧线电压、直流侧输出电压、直流侧输出电流,记录结果如表 2 所示,编号所对应的工况与表 1 相同。



图 4 实验现场照片

将仿真与试验结果进行对比,如图 5 所示。可知在仿真和试验中,当两路输出不平衡负载时,交流侧线电压差和直流电压差都随不平衡度的变化呈现相同的单调变化规律,仿真和试验结果较为吻合。

表 2 试验结果

编号	第 I 路输出			第 II 路输出			电压差	
	I_{dc1}/A	U_{dc1}/V	U_{ab1}/V	I_{dc2}/A	U_{dc2}/V	U_{ab2}/V	$\Delta U_{dc}/V$	$\Delta U_{ab}/V$
1	59	450.0	322.7	27	450.3	321.4	0.3	1.3
2	155	450.0	332.1	28	453.8	330.5	3.8	1.6
3	315	450.2	336.0	28	455.4	334.1	5.2	1.9
4	466	450.3	339.0	29	456.0	336.6	5.7	2.4
5	622	450.3	342.0	29	457.0	339.2	6.7	2.8
6	780	450.6	345.1	29	459.4	341.6	8.8	3.5
7	790	450.3	345.8	156	456.9	342.6	6.6	3.2
8	790	450.5	347.2	315	455.1	344.0	4.6	3.2
9	780	450.5	347.3	470	453.0	345.5	2.5	1.8
10	775	450.5	347.4	622	450.9	345.1	0.4	2.3

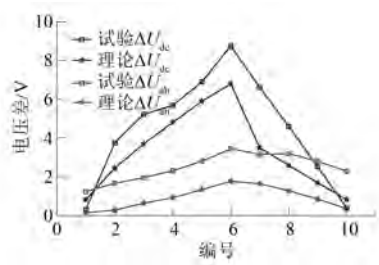


图 5 交直流侧电压差

4 结 语

本文首先分别在 abc 坐标系和 dq0 坐标系下建立了移 15°双十二相隐极同步整流发电机的基本数学方程,推导了电机电压、磁链、输出功率、电磁转矩和转子运动方程,然后在 MATLAB/Simulink 中,建立了移 15°双十二相隐极同步整流发电机的仿真模型,最后对两路输出进行了不平衡负载仿真和试验。通过仿真和试验结果可以得出以下结论。

(1) 在仿真和试验中,两路直流侧电压差以及交流侧基波有效值电压差都随不平衡度的变化呈现相同的单调变化规律,且电压差均在 20 V 以内,验证了移 15°双十二相隐极同步整流发电机数学模型的正确性。

(2) 进一步分析交流侧电压差可知,即使在两路负载分别为空载和满载时,电压差仍在较低水平,可有效避免因电网负载不同而导致出现一舷蓄电池过充的问题,有效解决了在舰船电力系统中,发电机因两路负载不同而产生的压差直接影响两路功率分配的问题。

移 15°双十二相隐极同步整流发电机数学模型的建立,为进一步深入分析双十二相同步整流

发电机运行性能和励磁控制系统奠定了基础。

【参 考 文 献】

[1] BARAN M E, MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 (6) : 1596.

[2] LIPO T A. Electric drives technology-part way to where? [C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Seattle, 1999 : 1.

[3] BRAZHINKOV A V, DOVZHENKO N N. Control potentials and advantages of multiphase AC drives [C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, Fukuoka, 1998 : 2108.

[4] YURIY Kats. Adjustable-speed drives with multiphase motors[C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, Milwaukee, 1997 : TC2/4.1-TC2/4.3.

[5] 庄朝晖,熊有伦,马挺.多相感应电机变频调速系统——回顾、现状及展望[J].电气传动,2001(2) : 3.

[6] 王晋.多相永磁电机的理论分析及其控制研究[D].武汉:华中科技大学,2010.

[7] 夏冠博,梁翰荪.船舶交流永磁同步电力推进[J].武汉造船,1996(5) : 21.

[8] 任修明,杨德望.船舶交流永磁推进电机的研究[J].船舶科学技术,2003,25(1) : 37.

[9] 李维斌,宣伟民,姚列英,等.双 Y 移 30°同步发电机的 Simulink 建模与仿真[J].微电机,2014(3) : 27.

[10] SINGH G K, PANT V, SINGH Y P. Voltage source inverter driven multi-phase induction [J]. Computers and Electrical Engineering, 2003, 29(3) : 813.

- [11] JORDAN H E, ZOWARKA R C, PRATAP S B. Nine-phase armature windings design, test and harmonic analysis[C]//EML 2004, 2004: 202.
- [12] 马伟明. 十二相发电机及其整流系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 1995.
- [13] 欧阳斌, 马伟明, 王东, 等. 大容量双六相储能电机系统分析技术[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(1): 92.
- [14] 王东, 吴新振, 马伟明, 等. 非正弦供电十五相感应电机磁路计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 58.
- [15] 王东, 吴新振, 马伟明, 等. 非正弦供电十五相感应电机定子漏抗计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 41.
- [16] 姚文熙, 胡海兵, 徐海杰, 等. 三电平六相同步电机变频调速技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 1.
- [17] 孙俊忠, 马伟明, 吴旭升, 等. 3/12 相双绕组发电机数学模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 93.
- [18] 付立军, 马伟明, 刘德志, 等. 十二/三相感应发电机的数值仿真与试验[J]. 电工技术学报, 2005, 20(6): 6.
- [19] 欧阳斌, 马伟明, 王东, 等. 大容量双六相储能电机系统建模与仿真[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(1): 92.
- [20] 欧阳斌, 晏明, 马伟明, 等. 移 40° 双九相同步电机数学模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 206.
- [21] 高景德, 张麟征. 电机过渡过程的基本理论及分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 12.

收稿日期: 2018-07-25

附录:

$$\begin{aligned}
 x_{aijaij} &= x_{ss} + x_{\delta 0} + x_{\delta 2} \cos 2[\theta - (j-1)15^\circ] \\
 x_{bijbij} &= x_{ss} + x_{\delta 0} + x_{\delta 2} \cos 2[\theta - 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{cijcij} &= x_{ss} + x_{\delta 0} + x_{\delta 2} \cos 2[\theta + 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{aijbij} &= x_{bijaij} = x_{s8} + x_{\delta 0} \cos 120^\circ + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2[\theta + 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{aijcij} &= x_{cijaij} = x_{s8} + x_{\delta 0} \cos 120^\circ + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2[\theta - 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{bijcij} &= x_{cijbij} = x_{s8} + x_{\delta 0} \cos 120^\circ + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2[\theta - (j-1)15^\circ] \\
 x_{a1ja2j} &= x_{a2ja1j} = x_{s0} + x_{\delta 0} + x_{\delta 2} \cos 2[\theta - (j-1)15^\circ] \\
 x_{b1jb2j} &= x_{b2jb1j} = x_{s0} + x_{\delta 0} + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2[\theta - 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{c1jc2j} &= x_{c2jc1j} = x_{s0} + x_{\delta 0} + x_{\delta 2} \\
 &\quad \cos 2[\theta + 120^\circ - (j-1)15^\circ] x_{aijamn} = \\
 &\quad x_{amnaij} = x_{s(n-j)} + x_{\delta 0} \cos(n-j)15^\circ + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \quad (j < n) \\
 x_{bijbmj} &= x_{bmnbij} = x_{s(n-j)} + x_{\delta 0} \cos(n-j)15^\circ + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta - 120^\circ - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \quad (j < n) \\
 x_{cijcmj} &= x_{cmncij} = x_{s(n-j)} + x_{\delta 0} \cos(n-j)15^\circ + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta + 120^\circ - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \quad (j < n) \\
 x_{aijbmn} &= x_{s(n-j+8)} + x_{\delta 0} \cos[(n-j)15^\circ + 120^\circ] +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta + 120^\circ - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \\
 x_{aijcmn} &= x_{s(j-n+8)} + x_{\delta 0} \cos[(n-j)15^\circ - 120^\circ] + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta - 120^\circ - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \\
 x_{bijamj} &= x_{s(j-n+8)} + x_{\delta 0} \cos[(n-j)15^\circ - 120^\circ] + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta + 120^\circ - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \\
 x_{bijcmj} &= x_{s(n-j+8)} + x_{\delta 0} \cos[(n-j)15^\circ + 120^\circ] + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \\
 x_{cijamj} &= x_{s(n-j+8)} + x_{\delta 0} \cos[(n-j)15^\circ + 120^\circ] + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta - 120^\circ - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \\
 x_{cijbmj} &= x_{s(j-n+8)} + x_{\delta 0} \cos[(n-j)15^\circ - 120^\circ] + \\
 &\quad x_{\delta 2} \cos 2\left[\theta - \left(\frac{n+j}{2} - 1\right)15^\circ\right] \\
 x_{aijld} &= x_{ald} \cos[\theta - (j-1)15^\circ] \\
 x_{bijld} &= x_{ald} \cos[\theta - 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{cijld} &= x_{ald} \cos[\theta + 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{aijkd} &= x_{akd} \cos[\theta - (j-1)15^\circ] \\
 x_{bijkd} &= x_{akd} \cos[\theta - 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{cijkd} &= x_{akd} \cos[\theta + 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{aijfq} &= -x_{afq} \sin[\theta - (j-1)15^\circ] \\
 x_{bijfq} &= -x_{afq} \sin[\theta - 120^\circ - (j-1)15^\circ]
 \end{aligned}$$

(下转第 94 页)

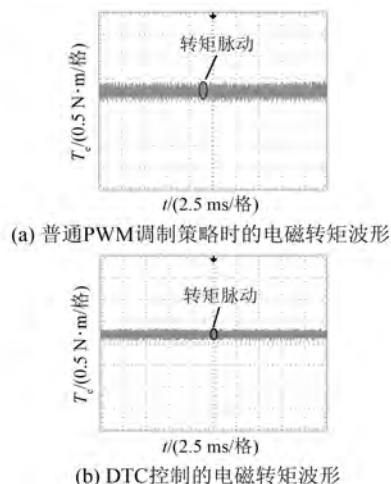


图13 BLDCM 电磁转矩电流波形

电磁转矩与相电流的关系,设计了相电流检测电路,并提出一种相电流的检测与处理方案:在软件中将数据进行复合滤波后再用最小二乘法及线性回归方程校正 AD 值,让误差降为更低。校正后,相电流作为转矩控制环输入量,便可精确计算转矩大小,并及时发出相应的电压脉冲矢量来抑制转矩脉动。

本文所采用的相电流检测与处理方案的硬件、软件简单方便,采样精度高,适用于高性能电机控制的场合。

【参考文献】

[1] BASZYNSKI M, PIROG S. A novel speed measurement method for a high-speed BLDC motor based on the signals from the rotor position sensor [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 10(1): 84.

[2] BIST V, SINGH B. PFC Cuk converter-fed BLDC motor drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(2): 871.

[3] CHEN S, LIU G, ZHENG S. Sensorless control of BLDCM drive for a high-speed Maglev blower using a low pass filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8845.

[4] 夏鲲,董斌,卢晶.一种基于电流反馈的分段式 PWM 控制无刷直流电机转矩波动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 172.

[5] 夏长亮,方红伟.永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 25.

[6] 王大方,于知杉,金毅,等.无位置传感器无刷直流电机无硬件滤波转子位置检测方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 71.

[7] 李珍国,章松发,周生海,等.考虑转矩脉动最小化的无刷直流电机直接转矩控制系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 139.

[8] XIA C L, WANG Y F, SHI T N. Implementation of finite-state model predictive control for commutation torque ripple minimization of permanent-magnet brushless DC motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 896.

[9] 殷帅,吕彩琴,马铁华.抑制无刷直流电机换相转矩脉动的新型电流控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(8): 47.

[10] 边春元,薛胜先,李世印,等.基于 DSP 的无刷直流电机电流峰值控制[J]. 东北大学学报, 2016, 37(7): 4.

[11] 胡育文,高瑾,杨建飞,等.永磁同步电动机直接转矩控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.

[12] 杨建飞,胡育文,刘建,等.两相导通 BLDCM DTC 电压空间矢量分析[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 95.

收稿日期: 2018-08-20

(上接第 65 页)

$$\begin{aligned}
 x_{cijlq} &= -x_{alq} \sin[\theta + 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{aijkq} &= -x_{akq} \sin[\theta - (j-1)15^\circ] \\
 x_{bijlq} &= -x_{akq} \sin[\theta - 120^\circ - (j-1)15^\circ] \\
 x_{dm2} &= x_{sm2} + x_{ady}, x_{dm3} = x_{sm3} + x_{ady} \\
 x_{qm1} &= x_{sm1} + x_{aqy}, x_{qm2} = x_{sm2} + x_{aqy} \\
 x_{qm3} &= x_{sm3} + x_{aqy}, x_{0m1} = x_{s1} + x_{s7} + x_{s9} \\
 x_{0m2} &= x_{s2} + x_{s6} + x_{s10} = x_{s6}, x_{0m3} = x_{s11} + x_{s3} + x_{s5} \\
 x_{dqm1} &= x_{s1} \sin 15^\circ - x_{s7} \sin 105^\circ + x_{s9} \sin 135^\circ \\
 x_{dqm2} &= x_{s2} \sin 30^\circ + x_{s10} \sin 150^\circ + x_{s6} \sin 90^\circ = x_6 \\
 x_{dqm3} &= -x_{s11} \sin 165^\circ - x_{s3} \sin 45^\circ + x_{s5} \sin 75^\circ = x_{dqm1} \\
 x_{sy} &= x_{ss} \cos 0^\circ + x_{s8} \cos 120^\circ + x_{s8} \cos 120^\circ = x_{ss} - x_{s8}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_{sy_0} &= x_{s0} \cos 0^\circ + x_{s8} \cos 120^\circ + x_{s8} \cos 120^\circ = x_{s0} - x_{s8} \\
 x_{sm1} &= x_{s1} \cos 15^\circ + x_{s7} \cos 105^\circ + x_{s9} \cos 135^\circ \\
 x_{sm2} &= x_{s2} \cos 30^\circ + x_{s10} \cos 150^\circ + x_{s6} \cos 90^\circ = 2x_{s2} \cos 30^\circ \\
 x_{sm3} &= x_{s11} \cos 165^\circ + x_{s5} \cos 75^\circ + x_{s3} \cos 45^\circ = x_{sm1} \\
 x_{dm1} &= x_{dm3}, x_{qm1} = x_{qm3}, x_{ady} = \frac{3}{2}x_{ad\phi} \\
 x_{aqy} &= \frac{3}{2}x_{aq\phi}, x_{adly} = \frac{3}{2}x_{ad\phi}, x_{akdy} = \frac{3}{2}x_{akd} \\
 x_{alqy} &= \frac{3}{2}x_{alq}, x_{akqy} = \frac{3}{2}x_{akq}
 \end{aligned}$$