

航空多级式无刷同步起动发电机联合模型研究



李子洁¹,焦宁飞¹,姚普¹,韩旭¹,段晓丽²

1.西北工业大学,陕西 西安 710072

2.航空电力系统航空科技重点实验室,陕西 西安 710065

摘要:建立准确的电机模型是深入研究航空多级式无刷同步起动发电机的基础。多级式无刷同步起动发电机的带载起动控制和发电调压控制主要由励磁机、旋转整流器和主电机组成的两级式系统实现。单一的对励磁机或主电机进行建模分析无法反映出二者的耦合关系,需要建立囊括励磁机、旋转整流器和主电机的两级式起动发电机联合模型。为了优化系统稳态和瞬态运行状态下电机模型精度,本文考虑磁场饱和以及主电机阻尼绕组因素影响,建立了一种基于VBR模型的同时考虑凸极因子变化和阻尼绕组影响的多级式起动发电机联合模型。通过与有限元模型的对比分析表明,所建模型提高了系统在稳态和瞬态过程中的仿真精度,验证了模型的有效性,对深入进行航空多级式无刷同步起动发电机的仿真分析具有重要意义。

关键词:多级式电机; VBR模型; 阻尼绕组; 磁场饱和; 凸极因子

中图分类号:V242.2

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.10.011

在“双碳”背景下,航空工业开始向绿色低碳转型技术发展^[1-2]。飞机多电/全电化是实现航空绿色发展和提高技术性能的重要途径,成为民用飞机和军用飞机的发展趋势^[3]。航空电源系统作为机载用电设备能量的来源,对多电/全电飞机的发展起着至关重要的作用。航空起动/发电一体化系统将航空发电机运行在电动状态带动航空发动机起动,起动完成后再由发动机带动发电机发电,省去了专门的起动设备,减小了系统体积重量(质量),简化了系统结构,对飞机电源系统具有重要意义^[4-6]。

多级式无刷同步起动发电系统凭借其可靠性高、发电品质好等优势成为多/全电飞机起动发电一体化系统的首选^[7]。由于在起动阶段,励磁机、旋转整流器和主电机直接参与起动过程,而副励磁机不参与;在发电阶段,副励磁机只起到对励磁机提供励磁的作用,也不直接参与发电稳压控制,所以在进行多级式起动发电系统建模研究时,仅需要对囊括励磁机、旋转整流器和主电机的两级式系统建模即可。而励磁机和主电机在机械、电磁等方面相互制约、相互

耦合,分别对两者进行建模分析并不能反映它们之间的相互耦合关系,所以建立一个能够反映二者耦合关系的起动发电一体化模型至关重要。

目前,大量学者都对建立准确的电机模型进行了研究。文献[8]将传统电机模型的输出电流信号转换成电流源,然后与 Matlab/Simulink/PSB 模块库中的旋转整流器直接相连,实现高质量、高效率的“电路—电机—控制”系统的联合仿真。文献[9]和[10]提出绕组式同步电机和异步电机的VBR模型,这种模型将电机绕组端电压转换成具有内阻抗的电压源,可以实现电机模型与电力电子电路的直接相连,但其仅是对励磁机和主电机的一侧进行VBR建模,另一侧仍是与信号源直接相连,无法与控制电路连接。文献[11]在此基础上提出了一种考虑磁场饱和的隐极式同步电机双边VBR模型,建立了具有完全解耦RL电路的双边定参数VBR模型,实现了电机两侧同时与电力电子电路连接。文献[12]提出了一种利用恒凸极因子实现考虑磁场饱和的凸极同步电机双边VBR建模方法,但由于在不同运行状态下

收稿日期: 2023-05-06; 退修日期: 2023-08-09; 录用日期: 2023-09-07

基金项目: 航空科学基金(20184053027); 国家自然科学基金(52177058)

引用格式: Li Zijie, Jiao Ningfei, Yao Pu, et al. Research on united model of aviation multi-stage brushless synchronous starter-generator[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(10): 84-91. 李子洁, 焦宁飞, 姚普, 等. 航空多级式无刷同步起动发电机联合模型研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(10): 84-91.

电机的凸极特性会变化,这样的恒凸极因子会造成明显的仿真误差。文献[13]在此基础上通过实时改变凸极因子参数,提出了一种考虑凸极因子变化的双边VBR模型,进一步提高了模型的准确性,但此模型未考虑阻尼绕组在系统动态运行过程中的影响。

航空多级式起动发电机在起动阶段,其定子侧需与起动发电控制器连接,而在发电阶段,其定子侧需与发电控制单元和负载相连。基于双边VBR模型的结构特点,建立此联合模型可以实现多级式起动发电机与外部电力电子电路直接连接的一体化结构。本文建立了一种基于双边VBR的考虑凸极因子变化和阻尼绕组影响的航空多级式起动发电机联合模型,并通过将其与有限元模型进行仿真对比分析,验证了此模型在稳态和瞬态仿真过程中的优化作用。

1 考虑凸极因子变化的联合模型

本文以基于单相励磁机的多级式无刷同步电机为研究对象,其结构示意图如图1所示,从左到右分别为励磁机、旋转整流器和主电机,三者同轴相连。

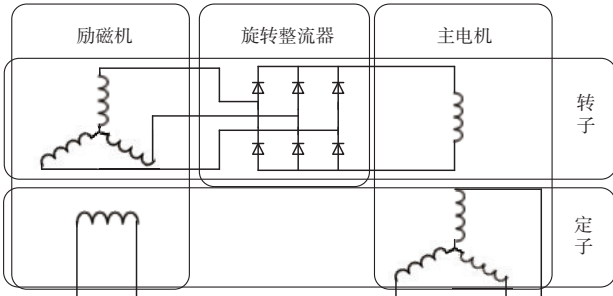


图1 基于单相励磁机的多级式无刷同步起动发电机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-stage brushless synchronous starter-generator (BSSG) based on single-phase brushless exciter

针对多级式无刷同步起动发电机联合模型的建立,本文建立由励磁机、旋转整流器和主电机组成的两级式系统联合模型,并主要针对主电机进行考虑凸极因子变化的研究分析。

在建模过程中进行了假设:(1)电机三相绕组在空间对称分布,气隙磁势与磁密在空间正弦分布;(2)不计铁芯损耗;(3)忽略互漏感;(4)忽略环境对电机参数的影响。

1.1 主电机电磁关系分析

在进行主电机电磁分析之前,首先需要将主电机转

子侧的变量和参数通过定转子有效匝数比转换到定子侧,并令转换到定子侧的转子侧变量和参数用上标“'”表示。

转换后的电压方程和磁链方程可表示为

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + p\lambda_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + p\lambda_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$u'_{gf} = R'_{gf} i'_{gf} + p\lambda'_{gf} \quad (3)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + \lambda_{md} \quad (4)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + \lambda_{mq} \quad (5)$$

$$\lambda'_{gf} = L'_{lgf} i'_{gf} + \lambda_{md} \quad (6)$$

式中, u_{ds} 、 u_{qs} 和 u'_{gf} 分别为定子绕组dq轴电压和转子绕组电压; i_{ds} 、 i_{qs} 和 i'_{gf} 分别为定子绕组dq轴电流和转子绕组电流; λ_{ds} 、 λ_{qs} 和 λ'_{gf} 分别为dq轴定子磁链和转子磁链; R_s 和 R_{gf} 为定子绕组电阻和转子绕组电阻; λ_{md} 和 λ_{mq} 分别为dq轴主磁链; L_{ls} 和 L'_{lgf} 分别为定子和转子漏电感; ω_r 为转子电角速度; p 为微分算子。

其中,dq轴主磁链可表示为

$$\lambda_{md} = L_{md} (i'_{gf} + i_{ds}) = L_{md} i_{md} \quad (7)$$

$$\lambda_{mq} = L_{mq} i_{qs} = L_{mq} i_{mq} \quad (8)$$

式中, L_{md} 和 L_{mq} 分别为dq轴主磁化电感。

凸极因子可被定义为

$$m = \sqrt{\frac{L_{mq}}{L_{md}}} \quad (9)$$

利用凸极因子可以将各向异性凸极电机转换为等效的各向同性电机,等效后的磁通量和磁化电流可表示为

$$\lambda_m = \sqrt{\lambda_{md}^2 + \left(\frac{\lambda_{mq}}{m}\right)^2} \quad (10)$$

$$i_m = \sqrt{i_{md}^2 + \left(mi_{mq}\right)^2} \quad (11)$$

所以主磁化电感可表示为

$$L_m = \frac{\lambda_m}{i_m} \quad (12)$$

由于主电机复杂的运行工况,不仅凸极因子发生变化, λ_m 和 i_m 之间的电磁关系同样在不停地改变,仅用式(12)来反映主电机的电磁特性是不合适的^[13]。利用有限元模型在不同运行状态下对主电机进行仿真,可以得到不同运行状态(不同的 i_{md} 和 i_{mq})下定转子磁链和电流值,并通过式(4)~式(11)计算不同运行状态下的凸极因子 m 和主磁通 λ_m ,其结果分别如图2和图3所示。

由图2和图3可以看出,分别考虑dq轴主磁化电流对主电机凸极因子和主磁通的影响是有意义的,因此凸极因子和主磁通可表示为

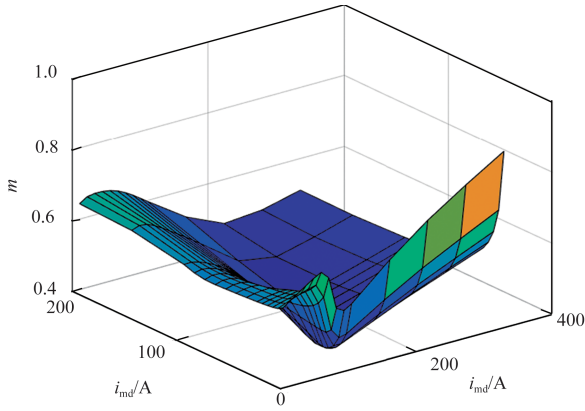


图2 主电机凸极因子波形图

Fig.2 The waveform of main machine's (MM's) saliency factor

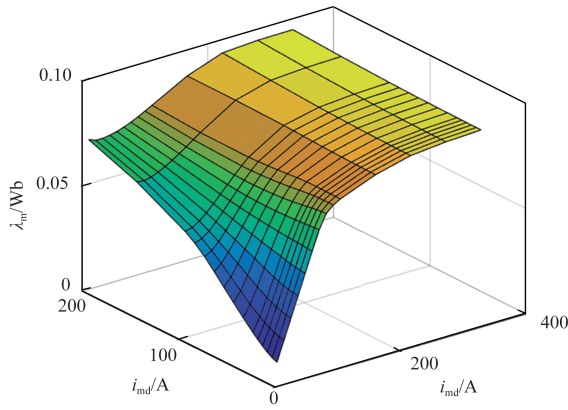


图3 主电机主磁通波形图

Fig.3 The waveform of MM's main magnetizing flux linkage

$$m = m(i_{md}, i_{mq}) \quad (13)$$

$$\lambda_m = \lambda_m(i_{md}, i_{mq})$$

且d轴主磁化电感可表示为

$$L_{md} = L_m = L_m(i_{md}, i_{mq}) \quad (14)$$

将式(9)代入式(7)和式(8),可得

$$\begin{aligned} \lambda_{md} &= L_m i_{md} \\ \lambda_{mq} &= m^2 L_m i_{mq} \end{aligned} \quad (15)$$

1.2 基于双边 VBR 的联合模型

双边 VBR 模型可以将电机定子侧和转子侧都转化为 VBR 的结构,实现电机两侧与电力电子电路的直接相连。

本文首先建立主电机的双边 VBR 模型。对式(7)和式(8)进行求导,可得

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{md} \\ \lambda_{mq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dd} & L_{dq} \\ L_{qd} & L_{qq} \end{bmatrix} \cdot p \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} L_{dd} &= \left(\frac{p\lambda_m}{pi_{md}} - L_m \frac{i_{md}}{i_m} \right) \frac{i_{md}}{i_m} + L_m \\ L_{dq} &= L_{qd} = \frac{p\lambda_m}{pi_{md}} \frac{m^2 i_{mq}}{i_m} - L_m \frac{m^2 i_{md} i_{mq}}{i_m^2} \end{aligned} \quad (17)$$

$$L_{qq} = \left(\frac{p\lambda_m}{pi_{mq}} - L_m \frac{m^2 i_{mq}}{i_m} \right) \frac{m^2 i_{mq}}{i_m} + m^2 L_m$$

将 L_m 分解为一个非饱和状态下的恒值和一个随 i_{md} 和 i_{mq} 变化的量,即

$$L_m = L_{mu} + \Delta L_m(i_{md}, i_{mq}) \quad (18)$$

因此, L_{dd} 和 L_{qq} 可被分解为

$$\begin{aligned} L_{dd} &= L_{mu} + \Delta L_{dd} \\ L_{qq} &= L_{mu} + \Delta L_{qq} \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta L_{dd} &= \left(\frac{p\lambda_m}{pi_{md}} - L_m \frac{i_{md}}{i_m} \right) \frac{i_{md}}{i_m} + \Delta L_m \\ \Delta L_{qq} &= \left(\frac{p\lambda_m}{pi_{mq}} - L_m \frac{m^2 i_{mq}}{i_m} \right) \frac{m^2 i_{mq}}{i_m} + m^2 \Delta L_m + (m^2 - 1) L_{mu} \end{aligned} \quad (20)$$

将式(16)代入式(1)至式(3),可得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} &= R_s \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + L'_{mus} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \omega_r L'_{mus} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ds}'' \\ e_{qs}'' \end{bmatrix} \\ u'_{gf} &= R'_{gf} i'_{gf} + L'_{muf} p i'_{gf} + e''_{gf} \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$L'_{mus} = L_{ls} + L_{mu} \quad (22)$$

$$L'_{muf} = L'_{lgf} + L_{mu}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_{ds}'' \\ e_{qs}'' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Delta L_{dd} & L_{dq} \\ L_{dq} & \Delta L_{qq} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{dd} \\ L_{dq} \end{bmatrix} p i'_{gf} + \\ &\quad \begin{bmatrix} -\omega_r [(m^2 - 1) L_{mu} + m^2 \Delta L_m] i_{qs} \\ \omega_r \Delta L_m i_{ds} + \omega_r L_m i'_{gf} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

$$e''_{gf} = \Delta L_{dd} p i'_{gf} + \begin{bmatrix} L_{dd} & L_{dq} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}$$

最后,将式(21)分别从 dq 轴转换到原始三相坐标系、

从定子侧转换到转子侧,可得

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + L'_{mus} p \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as}'' \\ e_{bs}'' \\ e_{cs}'' \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$u_{gf} = R'_{gf} i_{gf} + \frac{2}{3} \left(\frac{N_{gf}}{N_s} \right)^2 L'_{muf} p i_{gf} + e''_{gf}$$

其中

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_{as}'' \\ e_{bs}'' \\ e_{cs}'' \end{bmatrix} &= (T_{3r2r})^{-1} \begin{bmatrix} e_{ds}'' \\ e_{qs}'' \end{bmatrix} \\ e''_{gf} &= \frac{N_{gf}}{N_s} e''_{gf} \end{aligned} \quad (25)$$

由式(24)构成了主电机双边 VBR 模型,其原理图如图 4 所示。

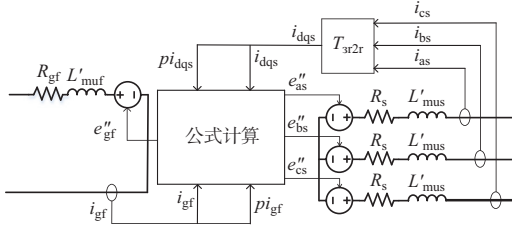


图4 主电机双边 VBR 原理图

Fig.4 Schematic diagram of double-side-VBR (DS-VBR) model of MM

由于励磁机和主电机同为凸极同步电机,两者数学模型相似、推导过程一致,本文不再赘述。将主电机和励磁机的双边 VBR 模型通过旋转整流器直接相连得到多级式无刷同步起动发电机联合模型,其原理图如图 5 所示。

从图 5 可以看出,励磁机和主电机的定转子侧都构建了 VBR 结构。基于此结构,励磁机和主电机的转子侧与旋转整流器连接,定子侧可以与控制电路直接连接,从而实现电机与控制电路的一体化。

2 考虑阻尼绕组的联合模型

本节主要针对主电机进行考虑阻尼绕组的双边 VBR 建模。同样需要将转子侧的变量和参数转换到定子侧。

转换后的电压方程和磁链方程可表示为

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} \quad (26)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} \quad (27)$$

$$u'_{gf} = R'_{gf} i'_{gf} + p \lambda'_{gf} \quad (28)$$

$$0 = R'_D i'_D + p \lambda'_D \quad (29)$$

$$0 = R'_Q i'_Q + p \lambda'_Q \quad (30)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + \lambda_{md} \quad (31)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + \lambda_{mq} \quad (32)$$

$$\lambda'_{gf} = L'_{lg} i'_{gf} + \lambda_{md} \quad (33)$$

$$\lambda'_D = L'_{lD} i'_D + \lambda_{md} \quad (34)$$

$$\lambda'_Q = L'_{lQ} i'_Q + \lambda_{mq} \quad (35)$$

式中, i'_D 和 i'_Q 分别为阻尼绕组 dq 轴电流; λ'_D 和 λ'_Q 分别为阻尼绕组 dq 轴磁链; R'_D 和 R'_Q 分别为阻尼绕组 dq 轴电阻和; L'_{lD} 和 L'_{lQ} 分别为阻尼绕组 dq 轴漏电感。

dq 轴主磁链可表示为

$$\lambda_{md} = L_{md} (i'_{gf} + i_{ds} + i'_D) = L_{md} i_{md} \quad (36)$$

$$\lambda_{mq} = L_{mq} (i_{qs} + i'_Q) = L_{mq} i_{mq} \quad (37)$$

对式(7)和式(8)进行求导,可得

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{md} \\ \lambda_{mq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dd} & L_{dq} \\ L_{dq} & L_{qq} \end{bmatrix} \cdot p \begin{bmatrix} i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} \quad (38)$$

其中

$$\begin{aligned} L_{dd} &= L_{mu} + \Delta L_{dd} \\ L_{qq} &= L_{mu} + \Delta L_{qq} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\Delta L_{dd} = \left(\frac{p \lambda_m}{p i_{md}} - L_m \frac{i_{md}}{i_m} \right) \frac{i_{md}}{i_m} + \Delta L_m$$

$$\Delta L_{qq} = \left(\frac{p \lambda_m}{p i_{mq}} - L_m \frac{m^2 i_{mq}}{i_m} \right) \frac{m^2 i_{mq}}{i_m} + m^2 \Delta L_m + (m^2 - 1) L_{mu} \quad (40)$$

将式(38)代入式(26)至式(30),可得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} &= R_s \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + L'_{mus} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \omega_r L'_{mus} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e''_{ds} \\ e''_{qs} \end{bmatrix} \\ u'_{gf} &= R'_{gf} i'_{gf} + L'_{muf} p i'_{gf} + e''_{gf} \\ 0 &= R'_D i'_D + L'_{mud} p i'_D + e''_D \\ 0 &= R'_Q i'_Q + L'_{muQ} p i'_Q + e''_Q \end{aligned} \quad (41)$$

其中

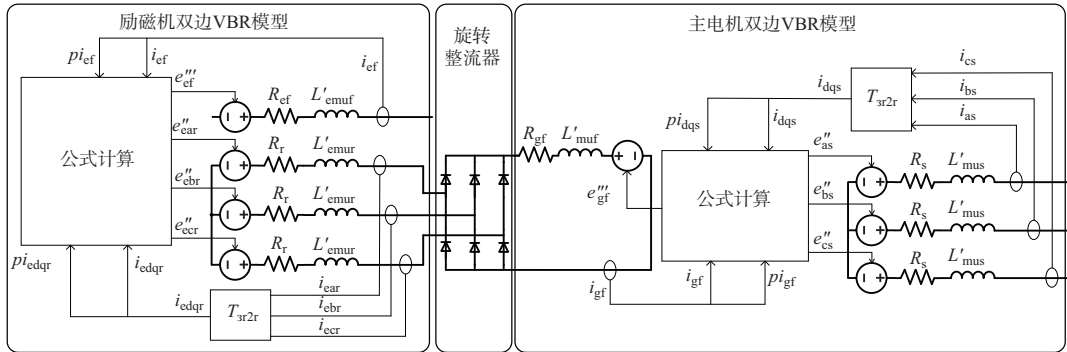


图5 多级式无刷同步起动发电机联合模型原理图

Fig.5 Schematic diagram of united model of multi-stage BSSG

$$\begin{aligned}
L'_{\text{mus}} &= L_{\text{ls}} + L_{\text{mu}} \\
L'_{\text{muf}} &= L'_{\text{lgf}} + L_{\text{mu}} \\
L'_{\text{muD}} &= L'_{\text{ID}} + L_{\text{mu}} \\
L'_{\text{muQ}} &= L'_{\text{IQ}} + L_{\text{mu}} \\
\begin{bmatrix} e''_{\text{ds}} \\ e''_{\text{qs}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\omega_r \{ [(m^2 - 1)L_{\text{mu}} + m^2 \Delta L_{\text{m}}] i_{\text{qs}} + L_{\text{mq}} i'_{\text{Q}} \} + \\ \omega_r \Delta L_{\text{m}} i_{\text{ds}} + \omega_r L_{\text{m}} i'_{\text{gf}} + \omega_r L_{\text{md}} i'_{\text{D}} \end{bmatrix} + \\
&\quad \begin{bmatrix} \Delta L_{\text{dd}} & L_{\text{dq}} \\ L_{\text{dq}} & \Delta L_{\text{qq}} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{\text{ds}} \\ i_{\text{qs}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\text{dd}} & L_{\text{dq}} \\ L_{\text{dq}} & L_{\text{qq}} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i'_{\text{gf}} + i'_{\text{D}} \\ i'_{\text{Q}} \end{bmatrix} \\
e''_{\text{gf}} &= \Delta L_{\text{dd}} p i'_{\text{gf}} + [L_{\text{dd}} \quad L_{\text{dq}}] p \begin{bmatrix} i_{\text{ds}} \\ i_{\text{qs}} \end{bmatrix} \\
e''_{\text{D}} &= \Delta L_{\text{dd}} p i'_{\text{D}} + [L_{\text{dd}} \quad L_{\text{dq}}] p \begin{bmatrix} i_{\text{ds}} + i'_{\text{gf}} \\ i_{\text{qs}} + i'_{\text{Q}} \end{bmatrix} \\
e''_{\text{Q}} &= \Delta L_{\text{qq}} p i'_{\text{Q}} + [L_{\text{qd}} \quad L_{\text{qq}}] p \begin{bmatrix} i_{\text{ds}} + i'_{\text{gf}} + i'_{\text{D}} \\ i_{\text{qs}} \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned}
e''_{\text{D}} &= \Delta L_{\text{dd}} p i'_{\text{D}} + [L_{\text{dd}} \quad L_{\text{dq}}] p \begin{bmatrix} i_{\text{ds}} + i'_{\text{gf}} \\ i_{\text{qs}} + i'_{\text{Q}} \end{bmatrix} \\
e''_{\text{Q}} &= \Delta L_{\text{qq}} p i'_{\text{Q}} + [L_{\text{qd}} \quad L_{\text{qq}}] p \begin{bmatrix} i_{\text{ds}} + i'_{\text{gf}} + i'_{\text{D}} \\ i_{\text{qs}} \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (43)$$

最后,将电枢绕组和励磁绕组侧方程分别从 dq 轴转换到原始三相坐标系、从定子侧转换到转子侧,此步骤与第1节相似,不再赘述。由此构成考虑阻尼绕组的主电机双边VBR模型,其原理图如图6所示。

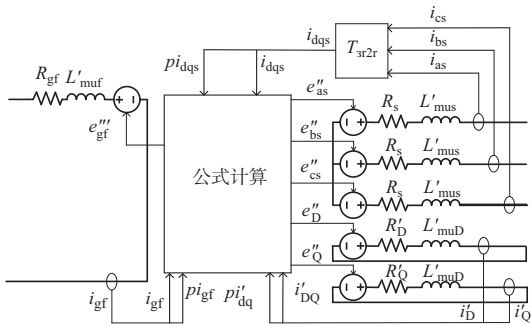


图6 考虑阻尼绕组的主电机双边VBR原理图

Fig.6 Schematic diagram of DS-VBR model of MM considering damping windings

由于励磁机没有阻尼绕组,其模型仍采用第1节中构建的双边VBR模型。将图5中的主电机双边VBR模型替换成图6所示模型,即可得到考虑主电机阻尼绕组影响的多级式起动发电机联合模型,其原理图不再显示。

3 仿真分析

有限元分析作为一种强大的数值分析方法,在多个领域得到应用。在电机建模领域,有限元模型常作为一种参照模型,与其他模型进行仿真对比研究,用以验证所建模型的准确性^[11-13]。

为了验证本文所建立的同时考虑阻尼绕组和凸极因子变化的多级式电机联合模型的仿真准确性,将其与有限元模型进行仿真对比,并同时与考虑定凸极因子和变凸极因

子的一体化模型进行对比,验证所建模型在稳态运行过程和瞬态运行过程中的优化作用。

因此,本节需要进行仿真对比分析的4个模型分别为:模型a:考虑定凸极因子的联合模型;模型b:考虑变凸极因子的联合模型;模型c:考虑阻尼绕组和变凸极因子的联合模型;模型d:有限元仿真分析联合模型。

本文建立的多级式电机联合模型,其中主电机额定参数见表1。

表1 主电机额定参数

Table 1 Rated parameters of main machine

额定功率/(kW·A)	额定相电压/V	额定频率/Hz	额定转速/(r/min)
40	115	400	12000

在MATLAB/Simulink仿真软件上分别搭建模型a、b、c;在Ansys/Maxwell仿真软件上建立模型d。其中,考虑阻尼绕组和变凸极因子的联合模型与有限元仿真分析联合模型如图7和图8所示。

3.1 稳态仿真分析

通过使主电机输出电压有效值保持不变(115V),记录不同工况下励磁机励磁电流的大小,并与有限元仿真结果进行仿真对比,结果见表2。

由表2可以看出,在大负载高饱和运行工况下,考虑变凸极因子的联合模型明显比定凸极因子的联合模型的仿真准确度高,且阻尼绕组的存在一般不影响系统在稳定状态下的仿真精度。

3.2 瞬态仿真分析

系统开始运行时,将上述4种模型的励磁机励磁电流维持在1.173A,此时负载为额定负载(40kW·A),并于0.08s时由额定负载突变至0.5倍额定负载(20kW·A),待系统稳定后于0.16s时再突变至1.5倍额定负载(60kW·A)。在此情况下进行三种模型与有限元模型的仿真分析,并进行主电机励磁电流的瞬态仿真对比,如图9所示。

由图9可以看出,阻尼绕组在系统动态运行过程中起到了较大作用。考虑了阻尼绕组的联合模型相较于未考虑阻尼绕组的联合模型,对于负载突变时引起的电流冲击起到了较好的缓冲作用,其瞬态波形也更趋近于有限元模型。

根据稳态和瞬态仿真分析可以发现,同时考虑了凸极因子变化和阻尼绕组影响后的联合模型,在稳态和瞬态的仿真精度上都有一定的提升,提高了模型的精度。

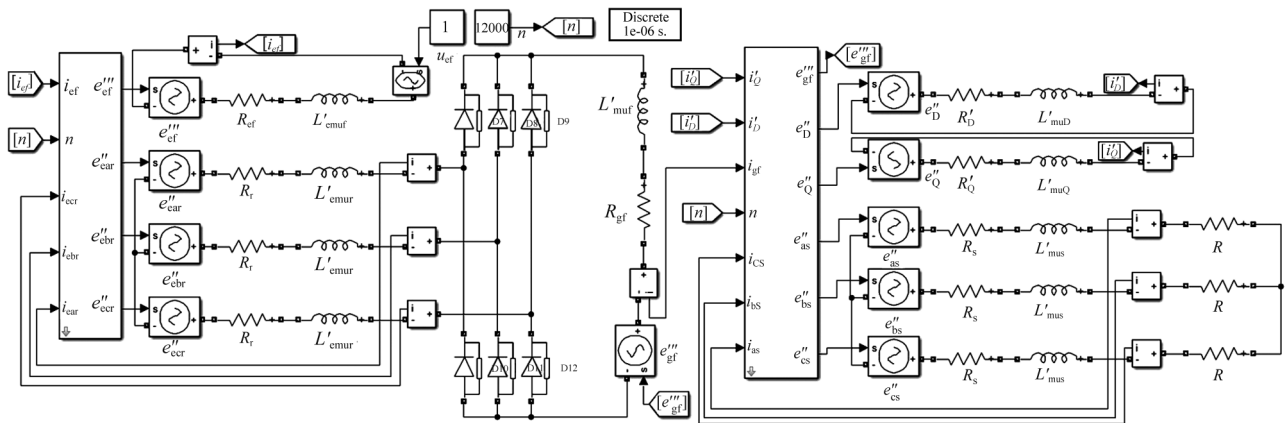


图7 考虑阻尼绕组和变凸极因子的联合模型

Fig.7 United model considering damping windings and saliency factor change

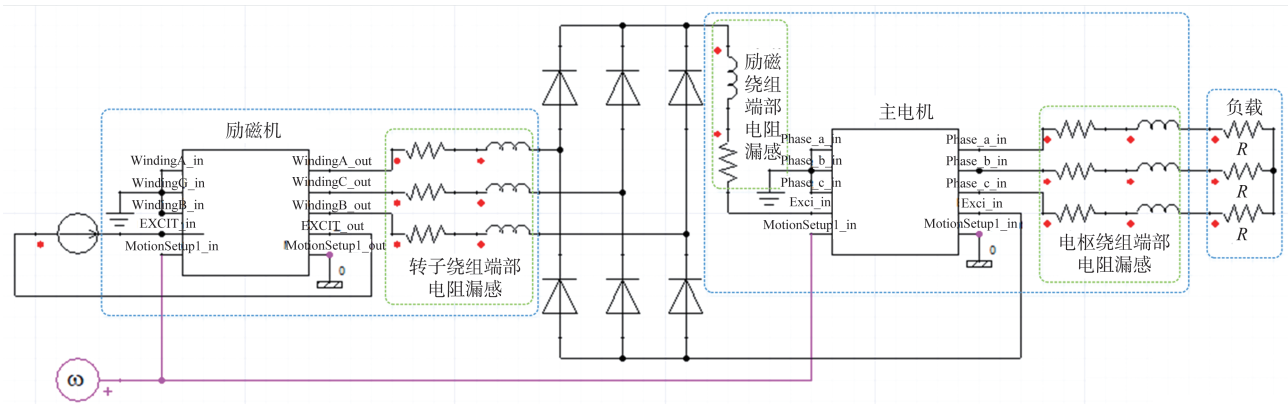


图8 有限元仿真联合模型

Fig.8 United model based on finite element analysis

表2 相同主电机输出电压下的励磁机励磁电流

Table 2 Simulation results of i_{ef} with same MM's output voltage

工况		40kV·A			60kV·A		
功率因数		1.00	0.75	0.95	1.00	0.75	0.75
励磁机励磁 电流 i_{ef} /A	模型a	1.24	1.57	0.97	1.78	2.17	2.81
	模型b	1.25	1.65	0.96	1.79	2.26	2.90
	模型c	1.25	1.65	0.96	1.79	2.26	2.90
	模型d	1.33	1.71	0.97	1.89	2.39	3.07
误差 a/%		6.77	8.19	0	5.82	9.21	8.47
误差 b/%		6.02	3.51	1.03	5.29	5.44	5.54
误差 c/%		6.02	3.51	1.03	5.29	5.44	5.54

4 结论

本文建立了一种同时考虑凸极因子变化和阻尼绕组影响的基于双边 VBR 的航空多级式无刷同步起动发电机联合模型,通过与有限元模型进行仿真对比,验证了模型的有效性和准确性。得出以下结论:

- (1)双边 VBR 结构可以实现多级式起动发电系统与外部电力电子电路直接相连的一体化结构;(2)考虑凸极因子变化的联合模型对提高模型在大负载高饱和和稳态运行状态的准确性起到了较大的作用,进一步提高了模型的精度;(3)考虑阻尼绕组的联合模型提高了模型在瞬态运行过程中的准确性。

AST

参考文献

[1] 李开省. 碳中和目标下航空能源转型研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(9): 1-11.
Li Kaisheng. Research on the transformation of aviation energy under the goal of carbon neutrality[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 1-11. (in Chinese)
[2] 纪宇晗,孙侠生,俞笑,等. 双碳战略下的新能源航空发展展望[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12): 1-11.
Ji Yuhan, Sun Xiasheng, Yu Xiao, et al. Development prospect

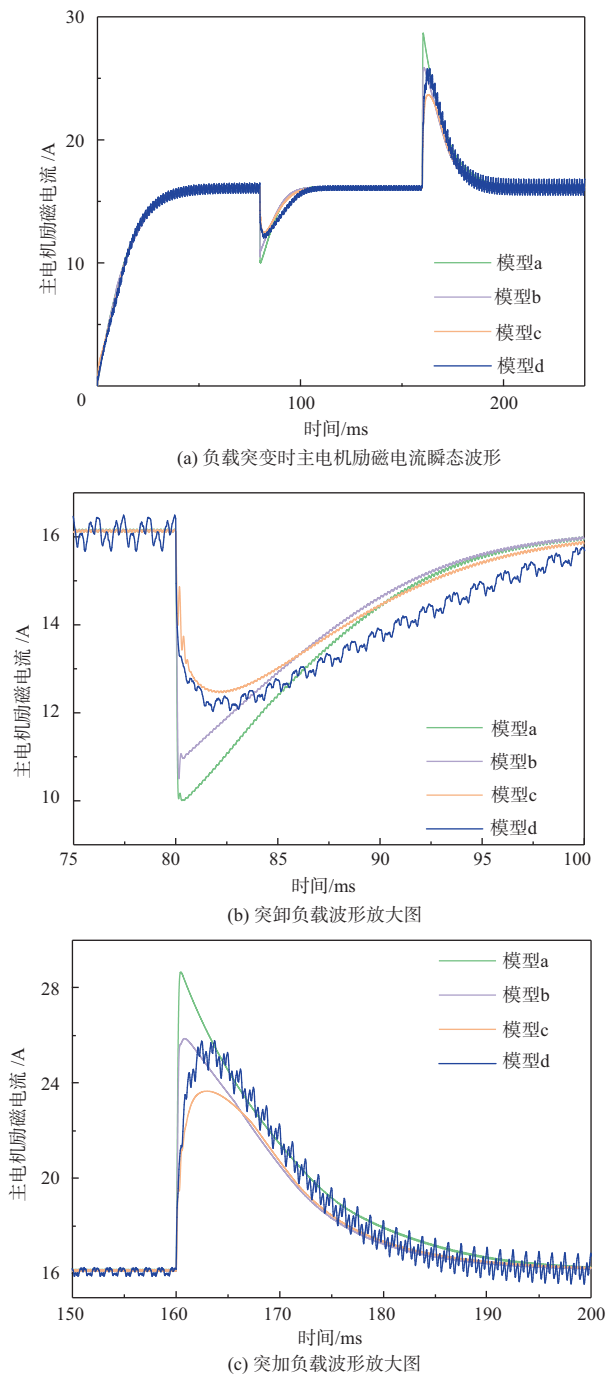


图9 负载突变时主电机励磁电流瞬态波形

Fig.9 Transient waveform of i_{gf} during sudden load changes

of new energy aviation under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 1-11. (in Chinese)

- [3] Sarlioglu B, Morris C T. More electric aircraft: Review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015,

1(1): 54-64.

- [4] 李岩,张超,王冬梅. 航空无刷同步电机起动发电系统电动运行励磁特性[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(2): 187-190.

Li Yan, Zhang Chao, Wang Dongmei. Excitation characteristics of aviation brushless synchronous starter-generator system during electric operation[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27 (2): 187-190. (in Chinese)

- [5] Bhangu B S, Rajashekara K. Electric starter generators: Their integration into gas turbine engines[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2014, 20(2): 14-22.

- [6] Friedrich G, Girardin A. Integrated starter generator[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2009, 15(4):26-34.

- [7] Wang Yinli, Nuzzo S, Zhang He, et al. Challenges and opportunities for wound field synchronous generators in future more electric aircraft [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1466-1477.

- [8] 顾毅康,胡育文. 电磁式无刷交流同步发电机的MATLAB/PSB建模[J]. 航空学报, 2002 (6): 583-586.

Gu Yikang, Hu Yuwen. MATLAB/PSB modeling of electromagnetic brushless AC synchronous generator [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002(6): 583-586. (in Chinese)

- [9] Cramer A M, Loop B P, Aliprantis D C. Synchronous machine model with voltage-behind-reactance formulation of stator and field windings[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(2): 391-402.

- [10] Wang Liwei, Jatskevich J, Pekarek S D. Modeling of induction machines using a voltage-behind-reactance formulation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 382-392.

- [11] Jiao Ningfei, Sun Chenghao, Zhang Xiaoke, et al. Double-side voltage-behind-reactance model of brushless exciter in aircraft wound-rotor synchronous starter-generator considering magnetic saturation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2358-2369.

- [12] Li Zijie, Jiao Ningfei, Yao Pu, et al. Integrated model of aircraft two-stage synchronous starter-generator considering magnetic saturation[C]. 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2021: 896-902.

- [13] Han Xu, Li Zijie, Jiao Ningfei, et al. Double-side voltage-

behind-reactance model of main machine in aircraft wound-rotor synchronous starter-generator considering saliency factor

change and equivalent iron loss resistance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(1): 662-673.

Research on United Model of Aviation Multi-stage Brushless Synchronous Starter-generator

Li Zijie¹, Jiao Ningfei¹, Yao Pu¹, Han Xu¹, Duan Xiaoli²

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Power System, Xi'an 710065, China

Abstract: The accurate model of multi-stage Brushless Synchronous Starter-Generator (BSSG) is necessary for the detailed analysis and advanced control research. The load starting control and voltage regulation control of the multi-stage BSSG are mainly achieved by a two-stage system composed of a Brushless Exciter (BE), a Rotating Rectifier (RR), and a Main Machine (MM). However, separated modeling of BE or MM cannot reflect the coupling relationship, so it is necessary to establish a united model of the two-stage BSSG including BE, RR and MM. In order to optimize machine's model accuracy under steady-state and transient operating conditions, this paper considered the influence on magnetic saturation and damping windings of MM, and a united model of multi-stage BSSG system based on VBR model and the influence on the saliency factor change and damping windings was proposed. The simulation comparative analysis with the finite element model shows that the proposed model improves the simulation accuracy of the system in both steady-state and transient processes, and verifies the effectiveness of the model, which is of great significance to conduct in-depth simulation analysis on aviation multi-stage BSSG.

Key Words: multi-stage machine; VBR model; damping winding; magnetic saturation; saliency factor

Received: 2023-05-06; Revised: 2023-08-09; Accepted: 2023-09-07

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20184053027); National Natural Science Foundation of China (52177058)