第 51 卷 第 12 期 电机与控制应用 Vol. 51 No. 12, December, 10, 2024
2024 年 12 月 10 日 Electric Machines & Control Application CCBY-NC-ND 4.0 License
DOI:10.12177/emca.2024.135 文章编号:1673-6540(2024)12-0103-10 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

基于场路耦合的混合励磁直流发电机特性仿真研究

曹正好[1], 赵朝会[2*], 张闻东[3], 高航宇[1]
(1.上海电机学院 电气学院,上海 201306;
2.无锡太湖学院 智能装备工程学院,江苏 无锡 214064;
3.东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

Simulation Study on Characteristics of a Hybrid Excitation DC Generator Based on Field-Circuit Coupling

CAO Zhenghao[1], ZHAO Chaohui[2*], ZHANG Wendong[3], GAO Hangyu[1]
(1. Electrical Engineering College, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;
2. School of Intelligent Equipment Engineering, Wuxi Taihu University, Wuxi 214064, China;
3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: **[Objective]** The air-gap magnetic field of permanent magnet generators is non-adjustable, resulting in a limited output voltage regulation range. To achieve an adjustable air-gap magnetic field, this paper studies a hybrid excitation DC generator with a tangential flux-concentrating parallel structure. **[Methods]** A Maxwell 2D and Simplorer field-circuit coupling model was built. The no-load characteristics and no-load air-gap flux density were simulated by finite element method. The parameter selection of related components in the filter circuit was discussed. The external characteristics were calculated, and the air-gap flux density and adjustment characteristics under armature reaction were analyzed. **[Results]** The simulation results showed that, under a constant external characteristic load, when the excitation current increased from −12 A to 0 A, the terminal voltage rose by 3.02 V. Further increasing the excitation current from 0 A to 12 A resulted in a terminal voltage increase of 24.66 V. Under armature reaction conditions, the amplitudes of the fundamental wave, 5P and 7P harmonics components of the air-gap flux density decreased by 0.05 T, 0.02 T, and 0.01 T, respectively, while the amplitudes of the 3P and 9P harmonics increased by 0.09 T and 0.03 T, respectively. The air-gap flux density curve exhibited a trend where one half was strengthened while the other half was weakened. **[Conclusion]** The no-load characteristics indicate that applying positive excitation to the generator is more effective than negative excitation, making it suitable for low-speed and high-torque applications. The output voltage increases with higher rotational speeds. The external characteristic curve shows that, under negative excitation current, the variation in the generator´s phase voltage root mean square value is relatively small, whereas under positive excitation current, the variation is significantly larger. In the adjustment characteristics, to maintain a constant generator terminal voltage, the excitation current must be increased as the load current increases.

Key words: no-load characteristics; external characteristics; regulation characteristics; air-gap flux density

摘 要:**【目的】**永磁发电机气隙磁场不可调节,导致输出电压调节范围较小。为实现气隙磁场可调节,文章研究了一种切向聚磁型并联结构混合励磁直流发电机。**【方法】**搭建 Maxwell 2D 与 Simplorer 场路耦合模型,采用有限元仿真了其空载特性与空载气隙磁密,讨论了其滤波电路中相关元件的参数选取,计算了其外特性,分析了电枢反应气隙磁密与调整特性。**【结果】**仿真结果表明,外特性负载一定时,励磁电流从−12 A 到 0 A,端电压增加了 3.02 V;励磁电流从 0 A 到 12 A,端电压增加了 24.66 V。电枢反应工况下,气隙磁密基波幅值、5P、7P 谐波幅值分别降低了 0.05 T、0.02 T、0.01 T,3P、9P 谐波幅值升高了 0.09 T、0.03 T,气隙磁密曲线呈现一半加强一半削弱趋势。**【结论】**空载特性反映了对该电机施加正励磁的效果优于负励磁,适合低速、大转矩场合,转速越高,输出电压越高。外特性曲线反映了在负励磁电流下,发电机相电压有效值变化较小;在正励磁电流下,发电机相电压有效

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

值变化很大。调整特性中,若使得发电机端电压保持不变,在增加负载电流的同时须增加励磁电流。

关键词: 空载特性; 外特性; 调节特性; 气隙磁密

0 引言

有刷直流发电机技术成熟、结构简单,但存在磨损和不便维护的问题。相比之下,无刷直流发电机功率大、效率高且体积小,广泛应用于航空航天、兵器、工业及伺服系统领域[1-2]。近年来,永磁发电机越来越多的应用于发电领域,且其取消了电刷与集电环结构,省去了产生磁场所需要的励磁功率,因而效率更高且没有励磁线圈,能使电机质量减轻[3]。但永磁发电机气隙磁场不可调节,导致输出电压调节范围较小。

混合励磁发电机可以通过调节励磁绕组电流实现气隙磁场调节,学者们对多种类型混合励磁发电机拓扑结构、调压原理、调压性能和设计方法等方面进行了深入研究,如混合励磁直流发电机、混合励磁爪极发电机和混合励磁同步发电机[4-6]。

混合励磁直流发电机在结构设计与优化方面取得了进展,学者们主要针对发电机输出电压不稳,设计出四相半波可控整流稳压器;为减少发电机电压恢复时间,学者们提出可控整流方法;为研究发电机的结构特点和绕组设计,学者们采用三维有限元的方法研究磁场和输出电压的调节性能,通过瞬态场有限元仿真对发电机的空载特性、外特性和调节特性进行分析[7-10]。混合励磁爪极发电机因为其转子上有若干个凸起的爪极,这些爪极上绕有励磁线圈,通过改变励磁线圈中的电流来改变磁场强度和方向[11]。由于混合励磁爪极发电机的特殊结构,学者们主要研究改进型爪极发电机,如双端混合励磁车载爪极发电机[12]、混合励磁爪极皮带式起动发电机[13]和串联磁路混合励磁爪极同步发电机[14]。混合励磁同步发电机综合了永磁发电机中永磁体能够提供稳定的磁场和电励磁同步发电机气隙磁场可以通过励磁进行调节的优点[15-16]。文献[17]研究新型电机的磁路,得到了电机气隙磁场随励磁电流的变化规律,验证其空载特性、负载特性以及电压可调整性。文献[18]为改善混合励磁同步发电机的气隙磁密分布,采用三段式气隙长度对转子进行了优化。为抑制电压谐波,在完成转子结构优化的基础上,进一步采用短距、分布电枢绕组以及定子斜槽等措施。文献[19]针对混合励磁永磁同步发电机的特殊磁路结构,介绍了一种交、直轴电抗参数的计算方法。

在切向磁化并联磁路混合励磁同步电机研究中,学者们分析了电机原理、电励磁势对永磁势和气隙磁场的影响、建立 Maxwell & Workbench & Optislong 联合仿真模型,运用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对该电机进行全局多目标优化,研究了不同励磁条件下电机磁场的变化规律、并联径向电磁力波及振动噪声等[20-22],但文献[20-22]作为发电机使用时的性能还未研究。

本文在文献[20-22]基础上研究了一种切向聚磁型并联结构混合励磁直流发电机(Tangential Magnetizing Parallel Structure Hybrid Excitation DC Generator, TMPS-HEDCG),介绍了该系统的工作参数,分析了其调磁原理,建立了 Maxwell 2D 和 Simplorer 的场路耦合模型,对发电机的空载特性、外特性和调整特性进行了研究。同时,分析了空载气隙磁密和电枢反应气隙磁密的变化情况,讨论了滤波电路中相关元件的参数选择。

1 TMPS-HEDCG 结构参数及调磁原理

1.1 TMPS-HEDCG 结构及参数

TMPS-HEDCG 由电机本体(Tangential Magnetizing Parallel Structure Hybrid Excitation Generator, TMPS-HEG)与不可控整流电路、LC 滤波电路、负载 R 四部分组成,该结构如图 1 所示。其中,TMPS-HEG 由定子、转子、永磁体、电枢绕组和直流励磁绕组组成;永磁体安装在相邻转子极靴侧面的矩形槽中,磁钢的充磁方向为切向充磁,由两块永磁体产生每极磁通。TMPS-HEG 的性能和结构参数如表 1 所示。

1.2 TMPS-HEG 调磁原理

TMPS-HEG 存在永磁磁势与直流励磁磁势两种磁势源,使用时保持永磁磁势的恒定,通过调节励磁电流的大小和方向改变整个电机的磁通。图 2 分别为TMPS-HEG励磁电流 $I_f = 0$ A、$I_f < 0$ A 和

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

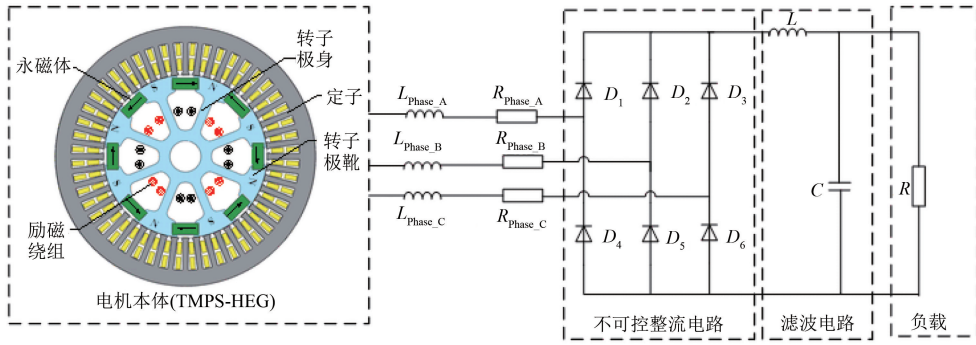


图 1　TMPS-HEDCG 结构图

Fig. 1　Structure diagram of TMPS-HEDCG

表 1　TMPS-HEG 性能和结构参数

Tab. 1　Performance and structural parameters of TMPS-HEG

参数名称	参数值	参数名称	参数值
功率/kW	1.5	槽数、极数	48、8
额定转速/(r·min^{-1})	3 500	励磁绕组匝数	40
额定电流/A	21	气隙长度/mm	0.25
绕组相数	3	铁心长度/mm	40

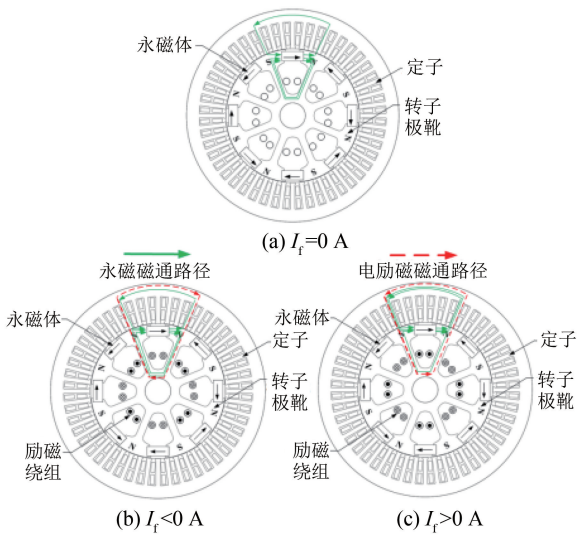


图 2　不同 I_f 下的永磁体与电励磁磁势路径

Fig. 2　Magnetic flux path of permanent magnet and electro-excitation under different I_f

I_f>0 A 的磁通路径。

由图 2 可知，永磁体的磁力线是从 N 极→转子极靴→转子极身→转子轭部→S 极；另一种路径为 N 极→气隙→定子轭部→S 极。电励磁产生的磁力线从转子轭部→转子极身→转子极靴→气隙→定子轭部→转子轭部，永磁体产生的磁势与电励磁产生的磁势并联。I_f=0 A 时，由于磁阻更小，故永磁体磁通在转子部分的磁通远大于在定子部分磁通；I_f<0 A 时，永磁体与电励磁产生的磁力线在转子部分方向相同、在定子部分方向相反，故转子部分产生磁通被加强，定子部分磁通被削弱。I_f>0 A 时，永磁体与电励磁产生的磁力线在转子部分方向相反、定子部分方向相同，故转子部分产生磁通被削弱，定子部分磁通被加强。综上所述，调节励磁电流的大小和方向会改变 TMPS-HEG 磁通。

2　基于 Maxwell 2D—Simplorer 场路耦合的电机性能仿真

为分析 TMPS-HEDCG 特性，本文搭建了 Maxwell 2D—Simplorer 场路耦合的模型，如图 3 所示。其中，FEA_2 为发电机 Maxwell 2D 模型，Engine_ss 为原动机拖动发电机至额定转速，R_{Phase}、L_{Phase} 分别为该发电机的内阻、内感，R 为负载。

2.1　TMPS-HEG 空载气隙磁密分析

TMPS-HEG 空载状况气隙磁密波形如图 4 所示。I_f=12 A，气隙磁密幅值较大；I_f=−12 A、0 A 时气隙磁密幅值较小且相差不大，说明 TMPS-HEG 弱磁能力较差。分析可知该发电机具有调磁能力且增磁能力较好，适用于低速大转矩场合。

TMPS-HEG 空载谐波空间次数如图 5 所示。由图 5 可知，I_f=0 A、−12 A 时，基波幅值分别为 0.33 T、0.25 T，相差较小，同时 11P、13P 谐波幅值也较小；I_f=12 A 基波幅值为 0.99 T，11P、13P 谐波幅值分别为 0.26 T、0.29 T，谐波幅值较大。通过气隙磁密谐波空间阶次的分析，可知气隙磁密波形正弦性较差。

2.2　TMPS-HEDCG 整流滤波电路参数设计

图 4 所示 TMPS-HEG 的空载气隙磁密波形

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

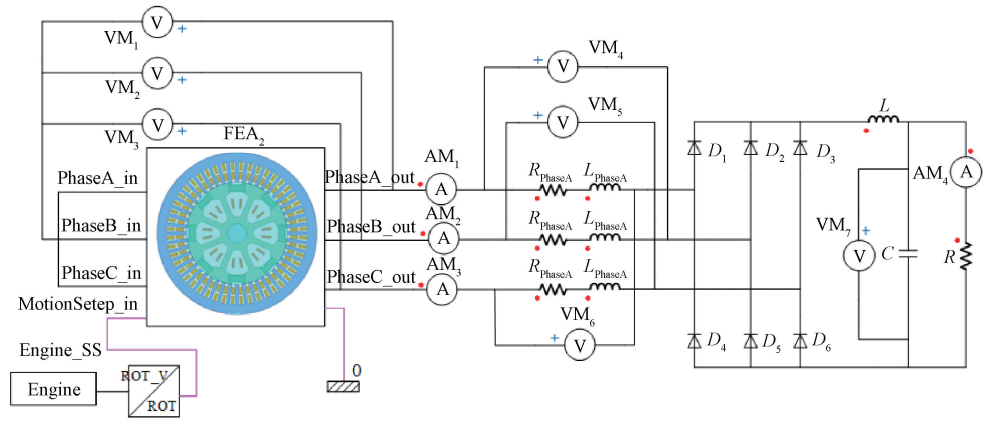


图 3　场路耦合示意图

Fig. 3　Schematic diagram of field-circuit coupling

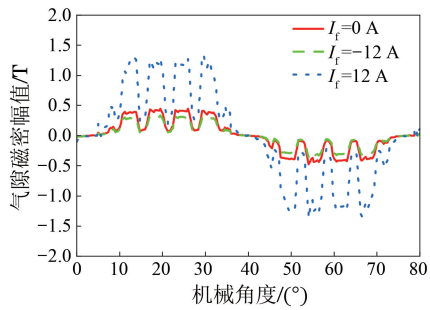


图 4　空载气隙磁密曲线

Fig. 4　No-load air-gap flux density curves

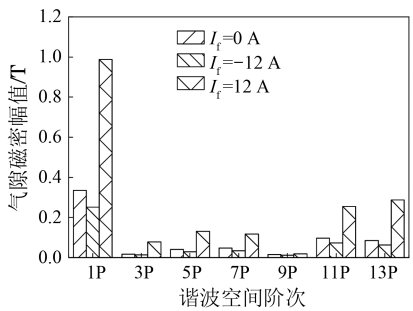


图 5　空载气隙谐波次数

Fig. 5　No-load air gap harmonic orders

非正弦,故本文在电机本体 TMPS-HEG 后加入整流滤波电路,构成了 TMPS-HEDCG 系统。在整流电路中,整流二极管输出的直流电压带有较大的脉动成分,合适的整流滤波电路将为系统提供稳定的直流电压输出。要使图 3 中 VM_7 输出直流电压 U_L 为 24 V,首先对电容 C 进行设计,须保持电感 $L=1$ mH,负载电阻 $R=6\ \Omega$ 不变。$I_f=0$ A,电容两端输出直流电压如图 6。由图 6 可知,60 ms 后输出直流电压达到稳态;电容值不同,U_L 也不同;当 $C=1$ mF 时,$U_L=25.5$ V;$C=3$ mF 时,$U_L=25$ V;$C=5$ mF 时,$U_L=24.5$ V;$C=8$ mF 时,$U_L=24$ V。因此,要使 U_L 达到 24 V,选择滤波电容为 8 mF 进行研究。

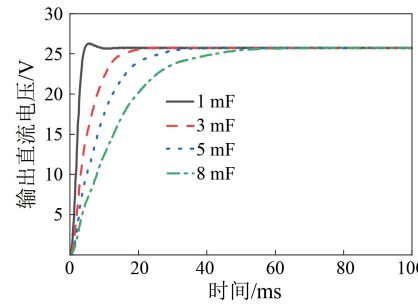


图 6　不同电容值输出电压

Fig. 6　Output voltage with different capacitance values

在滤波电路中,串联的电感主要作用是抑制冲击电流,从而起到滤波的作用。当电容 $C=8$ mF,负载电阻 $R=6\ \Omega$,电感分别为 1 mH、1 μH、1 H 时,电容两端输出直流电压如图 7 所示。由图 7 可知,$L=1$ mH、$L=1$ μH,在 60 ms 后输出直流电压达到稳态,而 $L=1$ H 未达到稳态。当 $L=1$ mH 时,$U_L=23.77$ V;当 $L=1$ μH 时,$U_L=23.87$ V。$L=1$ mH、$L=1$ μH 输出直流电压相差较小,同时考虑图 4 空载气隙磁密非正弦,谐波成分较多,从滤波效果来考虑,电感量越大越好。在后续研究中选取滤波电感为 1 mH。

为保持滤波电感 1 mH 和电容 8 mF 不变,不同励磁电流下输出直流电压,如图 8 所示。当 $I_f=0$ A 时,$U_L=24$ V;当 $I_f=12$ A 时,$U_L=73.66$ V;当 $I_f=-12$ A 时,$U_L=18.07$ V。此时 $R=6\ \Omega$、$L=1$ mH、$C=8$ mF,调节励磁电流可调节输出直流电压,励磁电流越大输出直流电压 U_L 越大。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

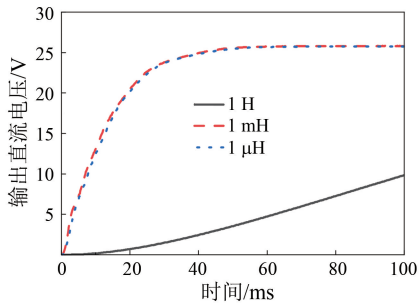


图 7　不同电感值输出电压

Fig. 7　Output voltage with different inductance values

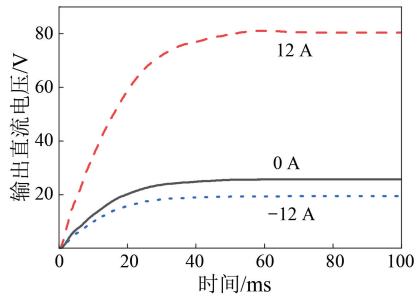


图 8　不同 I_f 下输出直流电压

Fig. 8　Output DC voltage under different I_f

3　TMPS-HEDCG 特性研究

3.1　TMPS-HEG 空载特性

空载特性指 TMPS-HEG 在额定转速 n_N 下，负载电流 I_L 为零时，空载反电动势 E_0 和转子上励磁电流 I_f 的变化曲线，即 $E_0=f(I_f)$。电机气隙中只有励磁电流所生的励磁磁动势 F_f 建立的励磁磁场和永磁体建立的磁场作为空载磁场，此时该发电机中，磁通量 ϕ、磁感应强度 B、磁动势 H 大小为

$$\phi = BS, B = \mu H, H = NI_f \tag{1}$$

式中：S 为导体单元面积；μ 为磁导率；N 为电枢绕组每组串联匝数，整理可得式(2)：

$$B = \mu N I_f, \phi = \mu N I_f S \tag{2}$$

此时 ϕ 正比于 I_f。

当高次谐波磁场被忽略时，由主磁场切割定子绕组感应出一组对称的三相空载反电动势有效值 E_0：

$$E_0 = 4.44 f N K_{dp} \phi K_\Phi \tag{3}$$

式中：K_{dp} 为绕组因数；K_Φ 为气隙磁通的波形系数。

由式(2)可得 E_0 正比于励磁电流 I_f，改变 I_f 可得到不同的 E_0。

TMPS-HEG 在不同转速下的空载特性曲线如图 9 所示，TMPS-HEDCG 在不同转速下的空载特性曲线如图 10 所示。图 9 中空载相反电动势有效值 E_0 随着转速的提高而增加。在转速为 2 500 r/min 时，E_0 较低，当通入转子励磁绕组中 I_f 的大小相同时，随着 TMPS-HEG 转速的提高，E_0 也越高；对比转速为 2 500 r/min 与 3 500 r/min 且 $I_f=0$ 时，转速提高 1 000 r/min，E_0 提高 5 V 左右；当转速为 2 500 r/min 与 4 000 r/min 且 $I_f=0$ A 时，转速提高 1 500 r/min，E_0 提高 7.5 V 左右；转速从 1 000 r/min 增加至 1 500 r/min，转速增加 500 r/min，在饱和区域 E_0 相差 8 V 左右。图 10 在不同转速下的空载曲线未达到饱和，需要增加励磁电流。

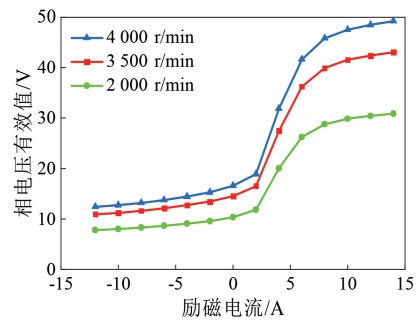


图 9　TMPS-HEG 空载特性

Fig. 9　No-load characteristics of TMPS-HEG

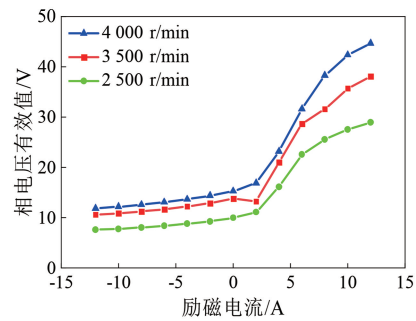


图 10　TMPS-HEDCG 空载特性

Fig. 10　No-load characteristics of TMPS-HEDCG

3.2　不同励磁电流下输出线电压

I_f 为 12 A、0 A、−12 A 时 TMPS-HEG 输出线电压 U_{ab} 如图 11 所示。由图 11 可知，I_f 为 12 A、0 A、−12 A 时，U_{ab} 有效值分别为 73 V、25 V、18 V。I_f 为 12 A 时，正向直流励磁电流作用下气隙磁场得到了较大增强，使得 U_{ab} 增加，且其曲线近似于正弦；但 I_f 为−12 A、0 A 时，U_{ab} 谐波次数

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

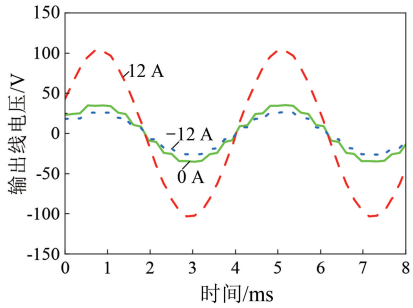
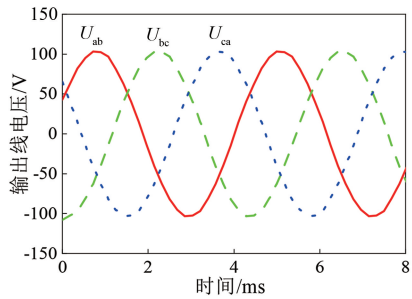


图 11　不同 I_f 下 U_{ab} 线电压

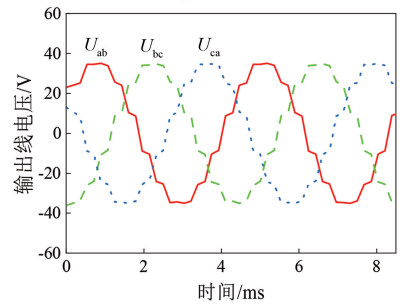
Fig. 11　U_{ab} line voltage under different I_f

较多且曲线非正弦。

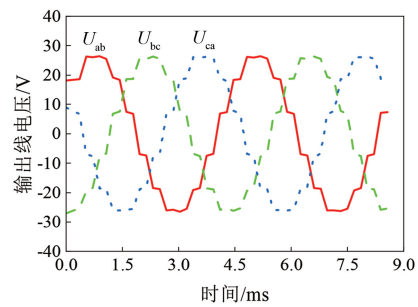
TMPS-HEG 在不同的 I_f 下输出线电压如图 12 所示。当 $I_f=-12$ A 时,输出三相线电压较低;I_f 的增加会增强磁场,进而提高三相输出线电压。在实际应用中,通过调节 I_f,可以调节输出线电压,从而满足不同负载条件下的电压要求。



(a) I_f为12 A线电压



(b) I_f为0 A线电压



(c) I_f为−12 A线电压

图 12　不同 I_f 输出线电压

Fig. 12　Output line voltage under different I_f

3.3　TMPS-HEDCG 外特性

负载为阻性,保持该发电机转速为 n_N、励磁电流 I_f 不变,负载电流 I_L 增加时,发电机相电压有效值 U 规律变化,即 $U=f(I_L)$,称为 TMPS-HEDCG 外特性。外特性曲线表明电枢反应对电机气隙磁场和气隙电势的影响以及绕组电阻和漏抗的压降随着负载电流的变化而变化,导致 U 也会随之发生变化。TMPS-HEDCG 外特性曲线如图 13 所示,I_f 分别为 12 A、5 A、3 A、0 A、−3 A、−5 A 和−12 A,$C=8$ mF,$L=1$ mH。由图 14 可知,在 n_N 和 I_f 保持一定时,TMPS-HEDCG 部分磁路饱和,在反向的 I_f 下,U 变化很小;在正向的 I_f 下,U 变化较大。其中,I_f 为 5 A 和 12 A 之间的 U 相差 15 V 左右,通过调节励磁电流能够达到增磁和去磁的目的,从而调节 U 大小。

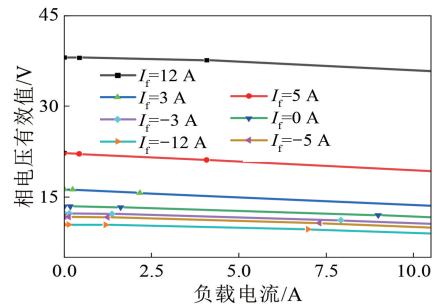


图 13　外特性曲线

Fig. 13　External characteristic curves

电枢反应工况气隙磁密如图 14 所示。与空载状况相比,电枢反应气隙磁密的大小与 I_f 有关。$I_f=12$ A 可以增强电枢反应气隙磁密,提高电机的励磁能力和工作性能;而 $I_f=0$ A、−12 A 电枢反应气隙磁密幅值减小且相差不大,并且径向气隙磁密呈现一半加强一半削弱趋势。负载为阻性时,当电流流过电枢绕组时,定子绕组产生磁

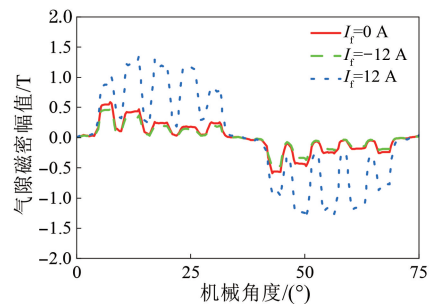


图 14　电枢反应工况气隙磁密

Fig. 14　Air-gap flux density under armature reaction conditions

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

场，称为电枢磁场。电枢磁场与直流励磁磁场相互作用，使得励磁磁场的磁力线发生偏转。这种偏转会导致励磁磁场中的磁感应强度和磁力线的分布发生变化。一般来说，电枢磁场会导致励磁磁场中的磁感应强度在电枢附近增大，而磁场强度在电枢附近减小。因此，在电枢附近，磁场的分布会发生扭曲和变形，从而导致电枢反应后径向气隙磁密发生变化。

电枢反应工况气隙磁密空间谐波阶次如图 15 所示。由图 15 可知，I_f = 12 A 时，基波幅值为 0.84 T，高于 I_f = 0 A、−12 A 的基波幅值 0.28 T、0.22 T；在不同励磁电流下 3P 谐波幅值分别为 0.14 T、0.11 T、0.09 T，高于空载气隙磁密谐波幅值。该发电机电枢电流产生的磁场与主磁场相互作用使得径向气隙磁密出现更多空间谐波成分。比较图 5 和图 15 空载气隙磁密谐波幅值与电枢反应工况谐波幅值，电枢反应后基波幅值、5P、7P 谐波幅值分别降低了 0.05 T、0.02 T、0.01 T，3P、9P 谐波幅值增加了 0.09 T、0.03 T，11P、13P 谐波幅值无明显变化。

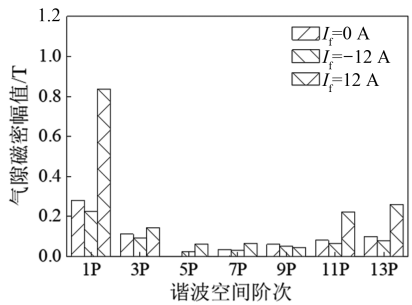


图 15 电枢反应工况气隙磁密空间谐波阶次

Fig. 15 Air-gap flux density spatial harmonic orders under armature reaction conditions

3.4 TMPS-HEDCG 的调整特性

调整特性是指保持 TMPS-HEDCG 转速为 n_N、输出电压 U 恒定，转子上辅助励磁绕组电流 I_f 与负载电流 I_L 之间的关系曲线，即 $I_f = f(I_L)$，如图 16 所示。此时 C = 8 mF，L = 1 mH。由图 16 可知，随着 I_L 的变化，U 也会在一定范围内波动。为了保持 U 稳定，I_L 增加的同时，也须调整 I_f。

4 结语

本文针对 TMPS-HEDCG，首先搭建了 Maxwell 2D 与 Simplorer 场路耦合模型研究了

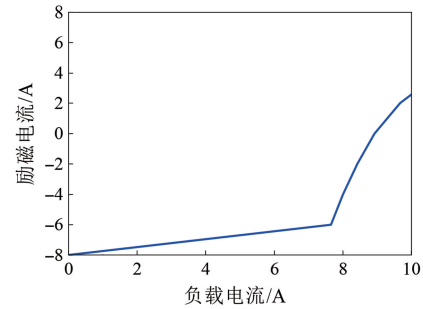


图 16 调整特性曲线

Fig. 16 Regulation characteristic curve

空载特性，其次讨论了空载气隙磁密波形，探讨了整流滤波电路中相关元件参数的选取。最后，比较分析了空载气隙磁密与电枢反应气隙磁密，计算了其空载特性、外特性及调节特性，得到以下结论：

（1）空载特性曲线以及空载气隙磁密波形表明，该发电机在负励磁的情况下弱磁能力较差增磁能力较好，适用于低速大转矩场合。

（2）由于空载气隙磁密非正弦，发出电压谐波成分较大，需要对 Simplorer 模块滤波电路中电感和电容大小进行合理设计。

（3）外特性曲线中，在负励磁电流下，发电机相电压有效值变化较小；在正励磁电流下，发电机相电压有效值变化很大。调整特性中，若使得发电机端电压保持不变，在增加负载电流的同时须增加励磁电流。

（4）负载为阻性时，电枢反应的气隙磁密在不同励磁电流下都呈现一半加强、一半削弱趋势；比较电枢反应与空载的气隙磁密谐波幅值，电枢反应后基波幅值和 5P、7P 谐波幅值变小，3P、9P 谐波幅值变大。

参 考 文 献

[1] 于立，吴咏梅，孙林楠，等. 航空并列式混合励磁无刷直流发电机短路特性研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(14)：4994-5003.
YU L，WU Y M，SUN L N，et al. Research on short-circuit characteristics of structure-parallel hybrid excitation brushless DC generator for aircraft electrical power system application [J]. Proceedings of the CSEE，2021，41(14)：4994-5003.

[2] 宋丽君，王燕. 一种无刷直流电机模糊自适应控制方法[J]. 制造技术与机床，2022，(4)：145-

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

148.
SONG L J, WANG Y. A fuzzy adaptive control method for brushless DC motor [J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2022, (4): 145-148.

[3] 郑雨墨, 赵轩辉, 周荔丹, 等. MP-MMC 驱动六相永磁同步发电机负载转矩观测前馈滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 1-9.
ZHENG Y M, ZHAO X H, ZHOU L D, et al. MP-MMC drive six-phase permanent magnet synchronous generator load torque observation feedforward sliding-mode control [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 1-9.

[4] 朱常青, 王秀和, 杨玉波, 等. 倍极感应作用下的并联式混合励磁同步发电机的结构与调压分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7890-7898+8226.
ZHU C Q, WANG X H, YANG Y B, et al. Structure and voltage regulation analysis of a parallel hybrid excitation synchronous generator based on double-pole induction [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7890-7898+8226.

[5] 夏永洪, 周琳, 王善铭, 等. 具有附加谐波绕组的混合励磁同步发电机结构和原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7880-7889+8225.
XIA Y H, ZHOU L, WANG S M, et al. Structure and principle of hybrid excitation synchronous generator with additional harmonic windings [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7880-7889+8225.

[6] 李健, 王凯, 朱姝姝,等. 集成感应式交替极混合励磁无刷直流发电机[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4209-4218.
LI J, WANG K, ZHU S S, et al. Consequent-pole hybrid excitation brushless DC generator based on integrated induction [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4209-4218.

[7] 张学义, 曾庆良, 史立伟. 车辆用 42 V 可控整流稳压式稀土永磁发电机的设计[J]. 微电机, 2011, 44(5): 21-23.
ZHANG X Y,ZENG Q L, SHI L W. Design on the 42 V controlled rectification and stabilizing voltage rare-earth permanent magnet generator for vehicle [J]. Micromotors, 2011, 44(5): 21-23.

[8] 梁学修, 许家群, 蒋杰, 等. 可控整流缩短连续极永磁发电机电压恢复时间[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 200-206.
LIANG X X, XU J Q, JIANG J, et al. Method of controllable rectification to shorten voltage recovery time of consequent-pole permanent magnet generator [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(22): 200-206.

[9] YE C Y, DU Y H, YANG J T, et al. Research of an axial flux stator partition hybrid excitation brushless synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-4.

[10] 余俊月, 曹煜, 朱姝姝, 等. 一种双端混合励磁的无刷直流发电机运行特性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4634-4641.
YU J Y, CAO Y, ZHU S S, et al. Analysis of operation characteristics for dual-direction hybrid excitation brushless DC generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4634-4641.

[11] YANG C F, LIN H Y, GUO J, et al. Design and analysis of a novel hybrid excitation synchronous machine with asymmetrically stagger permanent magnet [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4353-4356.

[12] 曹煜, 刘闯, 余俊月, 等. 基于磁路法的新型爪极发电机的性能计算[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 94-98+335.
CAO Y, LIU C, YU J Y, et al. Performance calculation of novel claw pole generator based on magnetic circuit method [J]. Computer Simulation, 2023, 40(10): 94-98+335.

[13] LI W, HUANG S, ZHANG Q. Multi-domain simulation analysis of a hybrid excitation claw-pole belt-alternator starter generator for hybrid electrical vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(36): 7-15.

[14] 赵朝会. 串联磁路混合励磁爪极发电机的结构设计和特性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 1-6+12.
ZHAO C H. Structure designing and characteristic study of HECPG which magnetic circuit series connection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 1-6+12.

[15] NEDJAR B, HLIOUI S, AMARA Y, et al. A new parallel double excitation synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(9): 2252-2260.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

[16] 宁银行，赵朝会，刘闯. 混合励磁电机的技术现状及新进展[J]. 电机与控制应用，2017，44(5)：1-12+26.
NING Y H，ZHAO C H，LIU C. Overview and new process of hybrid excitation motor [J]. Electric Machines & Control Application，2017，44(5)：1-12+26.

[17] 菅志军，张玉霖，朱伟红. 永磁-感应子式发电机电磁场与特性计算[J]. 微电机，2023，56(2)：17-20.
JIAN Z J，ZHANG Y L，ZHU W H. Electromagnetic field and characteristic calculation of permanent magnet induction generator [J]. Micromotors，2023，56(2)：17-20.

[18] 宁银行，鲁为华，赵朝会，等. 一种混合励磁同步发电机的气隙磁密分析及其电压谐波抑制[J]. 电机与控制应用，2019，46(1)：15-20.
NING Y H，LU W H，ZHAO C H，et al. Analysis on the air-gap flux density and voltage harmonic suppression of a hybrid excitation synchronous generator [J]. Electric Machines & Control Application，2019，46(1)：15-20.

[19] 宁杰，王晓宇，贾建国，等. 混合励磁永磁发电机电抗参数研究[J]. 电机与控制应用，2018，45(6)：72-75+116.
NING J，WANG X Y，JIA J G，et al. Research on reactance parameters of hybrid excitation permanent magnet generator [J]. Electric Machines & Control Application，2018，45(6)：72-75+116.

[20] PANG L，ZHAO C H，SHEN H B. Research on tangential magnetization parallel magnetic path hybrid excitation synchronous machine [J]. Electrical Engineering Technology，2022，17：2761-2770.

[21] ZHANG W D，PANG L，HU H D，et al. Excitation current on the influence of radial electromagnetic waves of tangential magnetizing parallel structure hybrid excitation synchronous motor [J]. 2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications，2023：852-861.

[22] 庞亮，张闻东，胡豁达，等. 基于粒子群优化算法的 TMPS-HESM 联合仿真设计方法[J]. 电机与控制应用，2023，50(1)：62-70.
PANG L，ZHANG W D，HU H D，et al. TMPS-HESM co-simulation design method based on particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Machines & Control Application，2023，50(1)：62-70.

收稿日期：2024-08-06
收到修改稿日期：2024-09-28

作者简介：
曹正好(1999-)，男，硕士研究生，研究方向为电机与电器智能化，18134544983@163.com；
*通信作者：赵朝会(1963-)，男，博士，教授，研究方向为电机与电器智能化、电力电子技术，zhaoch@sdju.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

 DOI: 10.12177/emca.2024.135

Simulation Study on Characteristics of a Hybrid Excitation DC Generator Based on Field-Circuit Coupling

CAO Zhenghao[1], ZHAO Chaohui[2*], ZHANG Wendong[3], GAO Hangyu[1]

(1. Electrical Engineering College, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;
2. School of Intelligent Equipment Engineering, Wuxi Taihu University, Wuxi 214064, China;
3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Key words: no-load characteristics; external characteristics; regulation characteristics; air-gap flux density

Firstly, the finite element analysis model of tangential magnetizing parallel structure hybrid excitation generator (TMPS-HEG) was built using Ansys Maxwell 2D. The performance and structural parameters of the TMPS-HEG were listed, and its magnetic adjustment principle was analyzed. The magnetic flux of TMPS-HEG can be altered by adjusting the magnitude and direction of excitation current.

Then, the field-circuit coupling system diagram was constructed with Maxwell 2D and Simplorer modules to analyze the no-load air-gap flux density curve and harmonic orders. The analysis showed that the generator had strong magnetic field regulation capabilities, with effective positive excitation and flux enhancement. It is suitable for low-speed and high-torque applications. Under the influence of positive excitation current, the fundamental wave amplitude was significant, and the amplitudes of the 11P and 13P harmonics were also substantial. Since the no-load air-gap flux density waveform of the TMPS-HEG was non-sinusoidal, a rectifier and filter circuit was added after the TMPS-HEG motor to form the tangential magnetizing parallel structure hybrid excitation DC generator (TMPS-HEDCG) system, and the influence of different capacitance and inductance values on the output DC voltage was studied.

Finally, the no-load characteristics, external characteristics, and regulation characteristics of the TMPS-HEDCG, as well as the air-gap flux density curve and harmonic frequencies after armature reaction, were analyzed. The results showed that in the no-load characteristics, the effective value of the no-load back electromotive force increased with increasing speed. In the external characteristics, the terminal voltage changed little under negative excitation current, while it changed significantly under positive excitation current. As the excitation current increased from −12 A to 0 A, the terminal voltage increased by 3.02 V, and as the excitation current increased from 0 A to 12 A, the terminal voltage increased by 24.66 V.

After armature reaction with a resistive load, the air gap flux density curve showed a trend where one half of the magnetic flux density was enhanced while the other half was weakened. When the excitation current was 0 A, the fundamental wave amplitude and the 5 P and 7 P harmonic amplitudes decreased by 0.05 T, 0.02 T, and 0.01 T, respectively, while the amplitudes of the 3 P and 9 P harmonics increased by 0.09 T and 0.03 T. The amplitude of the 11 P and 13 P harmonics showed no significant change. In the regulation characteristics, to maintain a constant terminal voltage of the generator, the excitation current must be increased as the load current increased.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.