

基于电磁-热耦合模型的电励磁双凸极发电机最大功率输出研究

Study on the Maximum Output Power Performance of Doubly Salient Generator Based on Coupled Electromagnetic/Thermal Model

桑渝 丰硕 姜文颖

南京航空航天大学

摘要:利用有限元仿真软件 JMAG-Designer 建立了一台电励磁双凸极发电机(DSEG)的有限元电磁-热耦合模型,对发电机的恒压调节特性进行了分析,讨论了电机在温度限制下的最大功率输出情况。为了确定发电机的最大输出功率,对电机在绕组绝缘材料临界温度时的各转速下的最大输出功率进行了分析。为验证有限元分析的有效性,研制了样机并搭建了实验平台,实验结果验证了仿真结果的正确性。

关键词:耦合分析;双凸极电机;热分析;最大功率输出

ABSTRACT: In this paper, the coupled EM/thermal finite element (FE) model is developed for the Doubly Salient Electromagnetic Generator (DSEG) with the FEA software suite JMAG-Designer. Based on FEA, regulation rule of constant output voltage is studied by controlling field current and armature current. The coupled model is used to determine the extent of thermal constraint's effect to generator's maximum output power. To ascertain the proposed generator's ultimate capacity, the maximum output power under critical temperature of winding's insulating materials is calculated and the ultimate power at different speeds then is obtained. A prototype of DSEG is manufactured and relevant experiment bed is set up to test the validity of results obtained from FEA. Experiment data confirm the simulation results.

KEY WORDS: coupled analysis, doubly salient machine, thermal analysis, ultimate power

1. 引言

电励磁双凸极发电机(doubly salient electro-magnet generator, DSEG)是一种由双凸极永磁电机衍生出的新型可变磁阻电机,原本定子上的永磁体被替换为励磁绕组。其转子结构简单可靠,适合高速运行。可控励磁电流的引入使得电励磁双凸极发电机的磁场易于控制,因此得到了航空航天,风力发电,电动汽车等领域众多学者的重视[1,2],图1所示为一18/12极结构的DSEG。文献[3]提出一种用于风力发电系统的新型三相12/8极无刷双馈双凸极电机(brushless double fed doubly salient machine, BDFDS),由于感应反电势的非正弦性,电励磁双凸极电机常用作无刷直流发电机,文献[4-5]详细分析了DSEG的发电特性。

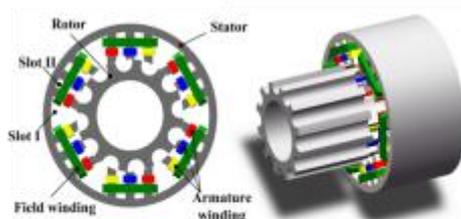


图1 18/12极DSEG的结构

随着对电机功率密度要求的提高,在电机的设计过程中通常会采用较高的电磁负荷,这导致了电机在运行过程中出现更高的温升,因此对电机温度场的研究引起了越来越多的关注[6,7]。电机达到温升极限时的绕组电流密度决定着电机的最大出力能力[8],因而电机的温度限制不仅在电机的设计过程意义重大,在电机的优化运行阶段同样有着重要的作用。电机的电磁场和温度场之间有紧密的联系,若要准确地对电机性能进行分析,二者缺一不可[9]。此外,对于发电机而言,它必须能够保持稳定电压输出以满足负载侧的要求。因此,如何在满足温度限制和恒压输出的要求下尽可能地提高绕组的电流密度就成为了本文研究的关键。

2. DSEG 电磁场和温度场建模

2.1 电机参数

本次研究主要针对一台 12kW, 18/12 结构 (18 定子极和 12 转子极) 的三相电励磁双凸极发电机 (DSEG), 定子上的励磁绕组与直流电源相连接, 电机工作于全封闭自冷环境下, 用于车载发电系统。电机的主要参数如表 1 所示,

表 1 18/12 极 DSEG 主要参数

参数	数值
定子外径 (mm)	245
转子外径 (mm)	149.6
轴向长度 (mm)	130
气隙长度 (mm)	0.3
定子槽数	18
转子极数	12
额定功率 (kW)	12
额定电压 (V)	720
额定转速 (r/min)	3200

2.2 电机的电磁模型与热模型

图 2 所示为电机的 2D 电磁模型, 本台电机作为发电机使用, 其运行时的主要损耗包括铜耗和铁耗, 其中计算铜耗时仅考虑铜线的直流损耗, 电机的铁耗则通过有限元电磁场分析软件 JMAG-Designer 进行计算。

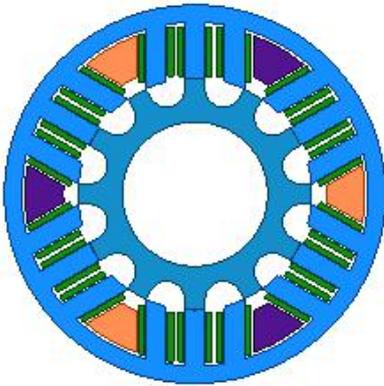


图 2.电机的 2D 电磁模型

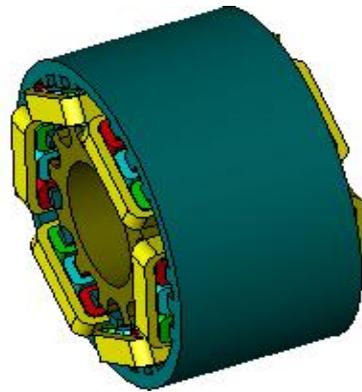


图 3.电机的 3D 温度场有限元模型

随后, 建立了用于电磁-热耦合分析的电机 3D 有限元温度场模型, 如图 3 所示。考虑到电机工作于全封闭自然风冷环境, 因此, 机壳表面的热传递方式可视为自然对流。

在电机的温度场分析中, 气隙两侧对流换热系数的确定是较为关键的步骤之一, 由于转子的旋转带动了气隙中空气的切向运动, 导致了温度场与流体场的耦合。这一切向运动可以用塔依洛尔数进行描述, 可表达为:

$$Ta = \frac{\rho^2 \omega_r^2 \gamma_m \delta^3}{\mu^2}$$

式中, ρ 为空气的密度, kg/m^3 ; μ 为空气的动力粘度, $kg/(m \cdot s)$; ω_r 是转子转动的角速度, rad/s ; δ 是气隙的长度, m ; γ_m 是定子内侧半径和转子外侧半径的平均值, m 。努塞特数可由塔依洛尔数确定, 用于计算定转子与气隙之间的对流换热系数, 努塞特数和塔依洛尔数之间的对应关系如下:

$$\begin{aligned} Nu &= 2 \quad (Ta < 1700) \\ Nu &= 0.128Ta^{0.367} \quad (1700 < Ta < 10^4) \\ Nu &= 0.409Ta^{0.241} \quad (10^4 < Ta < 10^7) \end{aligned}$$

努塞特数确定后, 定转子与气隙之间的对流换热系数可由下式计算得到,

$$h_{ag} = \frac{Nuk_{air}}{\delta}$$

其中 k_{air} 是空气的热导率。绕组中铜的热导率远大于绕组绝缘层的热导率, 为了便于进行温度场分析, 槽内所有导体和绝缘可以简化为一等效导热体, 等效导热体的热导率的计算公式如下:

$$\lambda_{eq} = \sum_{i=1}^n \delta_i / (\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i)$$

其中, λ_{eq} 是等效导热体的导热率, δ_i 是槽内各部分的等效厚度, λ_i 是槽内各材料的热导率, n 代表槽内材料种类。

本次研究中采用综合性电机分析软件 JMAG-Designer 进行电机的温度场分析。与其他有限元分析工具不同, 在温度场分析中, JMAG-Designer 对定转子间气隙的对流散热处理无需提前确定气隙两侧的具体温度, 为分析气隙与定转子之间的换热提供了方便。此外, 电机中所有的对流换热边界条件都可以通过内置热路的形式进行设置, 如图 4 所示, 以气隙中的换热为例, 热路图中定子内侧和转子外侧与气隙的对流换热边界连接在一起, 两侧的温度可视为相等。

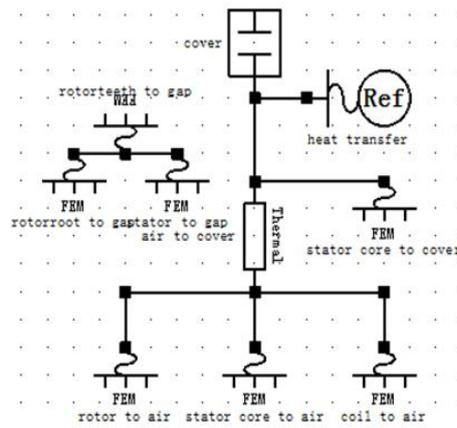


图 4 JMAG-Designer 中设置的等效热路

3. 发电机的恒压调节

电励磁双凸极发电机定子上存在两套绕组, 即励磁绕组和电枢绕组。因此若要保持其输出电压的恒定, 控制励磁电流与电枢电流是最基本的手段。另外, 由于电励磁双凸极发电机电压波形的非正弦性, 通常用作无刷直流发电机来使用, 通过三相全桥不控整流电路输出直流, 如图 5 所示,

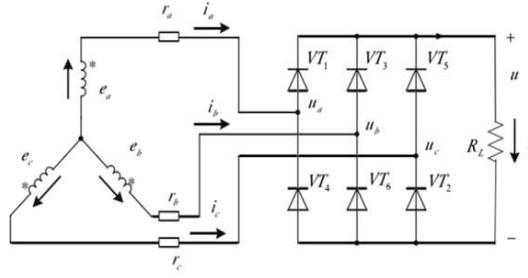


图 5 电励磁双凸极发电机的发电电路

根据图 5 中定义的电压和电流的方向，电励磁双凸极发电机的电压平衡方程可写为，

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + \omega \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + \mathbf{L} \cdot \frac{d}{dt} \mathbf{I}$$

其中，

$\mathbf{U} = [u_a, u_b, u_c, u_f]^T$ ，为电压矩阵；

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f \end{bmatrix}, \text{ 为电阻矩阵；}$$

$\mathbf{I} = [i_a, i_b, i_c, i_f]^T$ ，为电流矩阵；

$\Psi = [-\psi_a, -\psi_b, -\psi_c, \psi_f]^T$ ，为磁链矩阵；

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} -L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ac} & -L_{af} \\ -L_{ba} & -L_{bb} & -L_{bc} & -L_{bf} \\ -L_{ca} & -L_{cb} & -L_{cc} & -L_{cf} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} \end{bmatrix}, \text{ 为电感矩阵。}$$

由上式可知，电励磁双凸极发电机的反电势是各相电阻，电感，电流与磁链的函数。但是，电压平衡方程中可以直接控制的电磁参数只有励磁电流。电枢电流由负载侧所决定，负载在实验中也可以人为控制，所以理论上可以采用励磁电流和电枢电流作为发电机恒压调节的研究对象。对于本台电励磁双凸极发电机，需要将输出电压保持在额定电压 720V，在下面的分析中，需要通过结合励磁电流和电枢电流来调整输出电压。搭建好结合了发电机电磁模型与外电路的场路结合模型后，对发电机进行负载发电仿真测试。发电机在变负载下的恒压输出能力是衡量一台发电机性能最重要的指标之一。图 6 分别表示了电机转速在 3000r/min 和 8000r/min 下励磁电流和电枢电流变化时输出电压的变化情况。

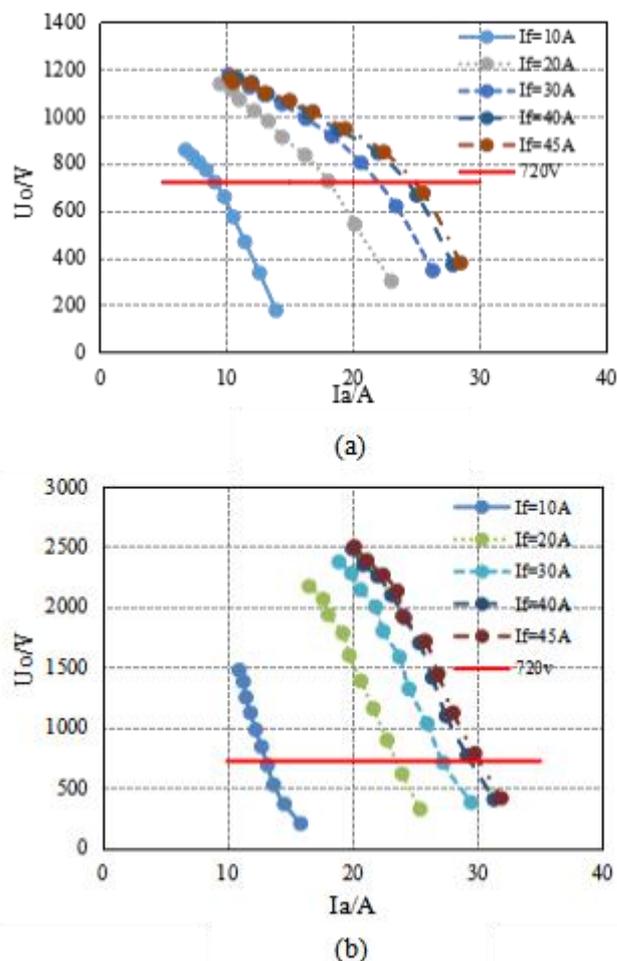
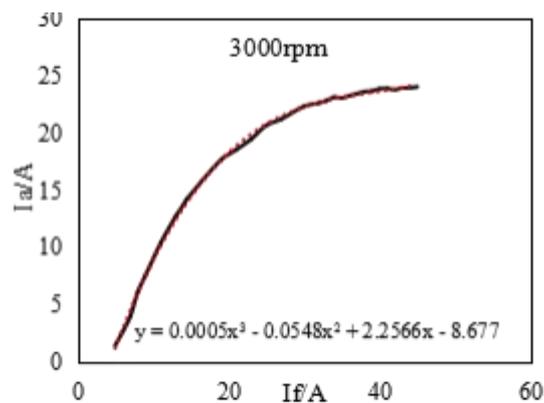


图 6 不同励磁电流和电枢电流下的输出电压 (a)3000r/min 下 (b)8000r/min 下

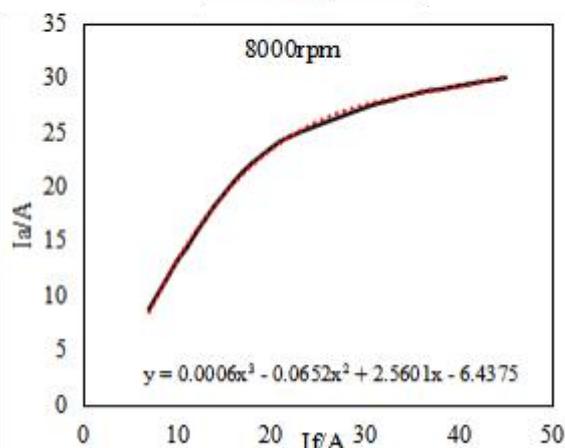
如图所示，固定转速，分别对励磁电流与阻性负载进行参数化扫描，选取不同励磁电流下输出额定 720V 电压时对应的电枢电流，即图中 720V 平行红线与各励磁电流对应的输出电压关系曲线的交点，如此便可得到某一转速下的一组励磁电流与电枢电流，然后由同样的方式可得到其他转速下输出电压和电枢电流的关系。例如图 6 (a)中，当发电机运行速度为 3000r/min，励磁电流为 10A 时，对应的电枢电流为 9.8A。根据有限元仿真结果调整电机的励磁电流和电枢电流实现发电机的恒压调节。

由图 6 可以看到，随着励磁电流的增大，相应的电枢电流单调增大，那么对于给定的输出电压，若励磁电流已定，则对应的电枢电流也是确定的。由此，当发电机的输出电压稳定在额定电压 720V 时，电机励磁电流和电枢电流之间的关系就可被推导出来。图 7 所示为电机分别在 3000r/min 和 8000r/min 两个转速下的恒压调节特性曲线，图 7 (a)和(b)中的调节曲线都可以用三次多项式很好地拟合。

事实上，发电机在各个转速下的恒压调节曲线都可以较好地进行三次拟合，这意味着如果在某一转速下励磁电流已定，便可以快速地获得相应的电枢电流。此外，二者的关系对后文电磁-热耦合分析中最大电流的确定具有非常重要的作用。



(a)



(b)

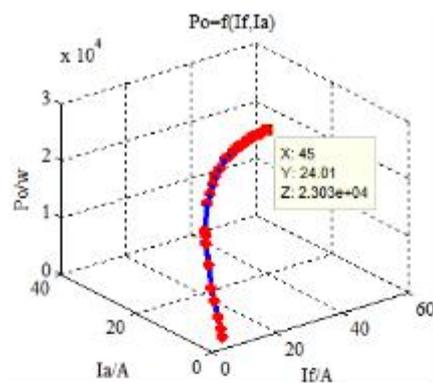
图7 不同转速下的恒压调节特性 (a)3000r/min下 (b)8000r/min下

4. 发电机最大功率分析

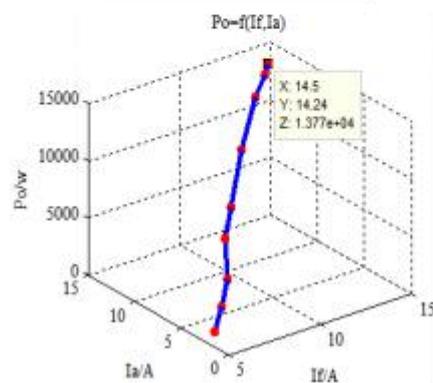
温度限制是定子绕组所能承受最大电流密度的主要限制条件之一，即在电机恒压输出时，温度限制了功率的增加。电机绕组的绝缘材料对高温极其敏感，本次研究中 12kW DSEG 绕组采用 C 级绝缘，其可承受的最高温度为 220℃。为了得到温度对电机最大电流密度和发电机最大出力的影响，在本次研究中采用电磁场和温度场耦合分析。在有限元计算中，将电机电磁分析所得结果施加到温度场分析中，即可得到电机的温升情况。

此前已经建立了电机的电磁-热耦合模型。当确定所有必要参数和相关条件并设置完成后，就可以在 JMAG-Designer 有限元分析软件中进行耦合仿真，由于需要记录观察点的稳态温度，因而稳态温度场的有限元分析是仿真的关键。

各励磁电流和电枢电流下发电机出力如图 8 所示，图 8(a)做出了 3000r/min 下不考虑温度限制时电机的输出功率与励磁电流和电枢电流的三维关系曲线，这种情况下电机的最大输出功率可以达到 23KW。图 8(b)所示为加入了 220℃温度限制后电机输出功率与励磁电流和电枢电流之间的三维曲线，此时电机的最大输出功率降为了 14KW，同时，还可以发现由于温度限制的加入，电机允许的励磁电流和电枢电流范围受到了很大的限制。



(a)



(b)

图 8 不同励磁电流和电枢电流下的输出功率 (a)无温度限制 (b)有温度限制

对于车载发电机来说, 应具有宽转速运行的能力, 即在较大的转速变化范围内电机的功率输出能力都能满足要求, 因此, 对温度限制给定情况下, 电机在不同转速下能输出的最大功率进行研究非常重要。

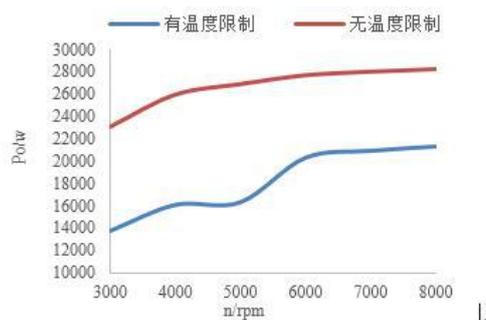


图 9 温度限制对电机极限输出功率的影响

为了更加深入研究电机在不同转速下的输出能力, 现将电机温度限制设定为 220°C , 即绕组绝缘能承受的最高温度, 观察电机的极限输出能力。作出了电机在有温度限制和无温度限制情况下的最大功率输出对比, 如图 9 所示。由图可见, 温度很大程度上限制了发电机的最大功率输出。此外, 无论是否有温度限制, 发电机的最大输出功率随着转速的升高而增大。可以总结为, 电机在恒压恒温工作状态下, 随着转速的升高, 电机最大输出功率也在逐渐升高。

5. 实验验证与研究

为了验证有限元分析的正确性，搭建了电励磁双凸极发电机的实验平台如图 10 所示。

在电机绕组中埋置了两个温度传感器以实时监测电机绕组的温度。如图 11 所示，T1 位置的传感器测量励磁绕组的温度，T2 位置的传感器测量电枢绕组的温度。

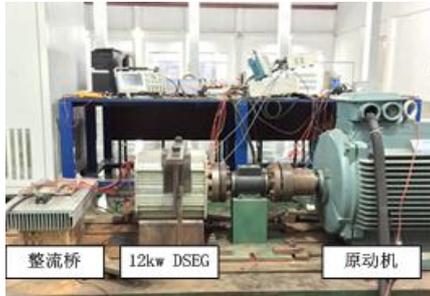


图 10 12KW DSEG 实验平台

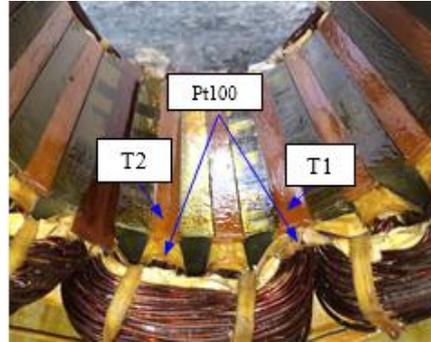


图 11 温度传感器埋设位置

首先，记录电机在额定情况下励磁绕组温度达到稳定值的过程，并与暂态温度场仿真结果进行比较，如图 12 所示。由图可见，仿真结果与实验结果具有较好的一致性，验证了三维热模型的合理性。此外，在温度达到稳态的过程中，在两个小时励磁绕组的温度基本不再变化。

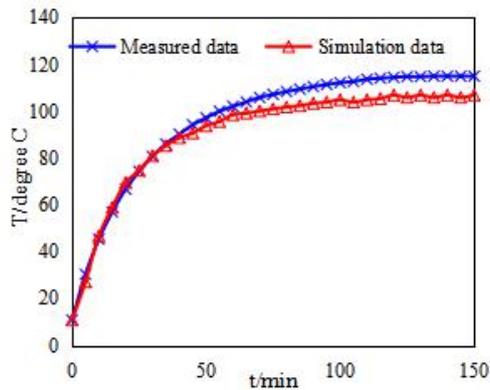
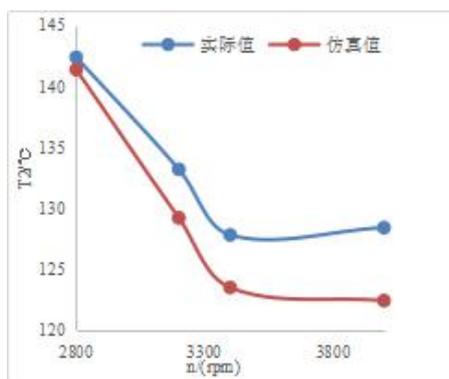
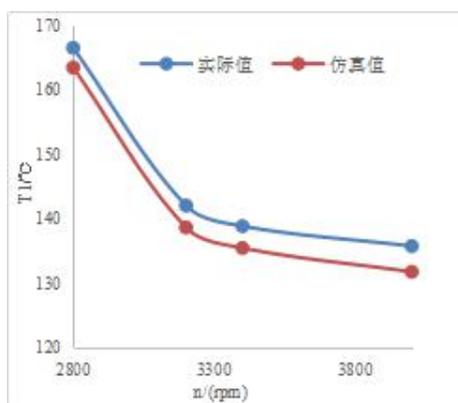


图 12 励磁绕组温度的稳定过程(T1)

为了验证电磁-热耦合分析的准确性，对电机在四个转速下分别进行了实验，实验中保持发电机的输出端电压和输出功率一定，让发电机运行至温度达到稳态并记录下绕组的稳态温度。作出不同转速下温度达稳态时位置 T1 和位置 T2 的温度值如图 13 所示。可以发现，电机工作在恒压恒功率情况下时，励磁绕组和电枢绕组的稳态温度都随着电机转速的升高而减小。这一现象与之前的仿真结果一致，即电机工作在恒压恒功率条件下时，转速越高，电机能输出的最大功率越大。同时，仿真结果中绕组稳态温度的变化趋势也与实验结果相一致，也进一步验证了电磁-热耦合分析的准确性。



(a)



(b)

图 13 不同转速下仿真与实验温升对比(a)位置 T1 (b)位置 T2

6. 总结

本文对一台 18/12 结构的电励磁双凸极发电机进行了研究，建立了电机的有限元电磁模型和热模型，并进行了电磁-热耦合分析。讨论了电励磁双凸极发电机的恒压调节特性并且得到电枢电流和励磁电流之间的关系可以拟合为三次多项式的结论。

本文还对发电机在有无温度限制情况下恒压输出时的最大输出功率进行了研究，当考虑温度限制后，发电机的最大功率输出能力大幅减小。为了进一步研究发电机的最大输出能力，通过电磁-热耦合分析方法对电机在温度限制内不同转速下的最大功率输出情况进行了分析。同时，得到了电机在极限温度限制下最大出力对应的最大励磁电流和电枢电流。最后，对所研制的电励磁双凸极发电机进行了实验，验证了此前仿真的准确性与合理性。研究发现，发电机运行于恒压恒功率的状态下时，随着转速升高，绕组温度反而会降低，这在仿真和实验中都得到了验证。

7. 参考文献

- [1] Zhuoran Zhang, Yangyang Tao, ‘ ‘Investigation of a New Topology of Hybrid Excitation Doubly Salient Brushless DC Generator’ ’, IEEE Trans on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, 2550–2556. June 2012.
- [2] Zhuoran Zhang, Yangguang Yan, and Yangyang Tao, ‘ ‘A new topology of low speed doubly salient brushless dc generator for wind power generation,’ ’ IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 3, pp. 1227–1233, Mar. 2012.

-
- [3] Zhuoran Zhang, Yu Wang, Yu Sang, Li Yu., "Efficiency Improvement and Thermal Analysis of A Total Enclosed Self-cooling Doubly Salient Generator for Stand-alone Power System," *IEEE Trans on Magnetics*, vol. 52, no. 7, July. 2016.
- [4] Y. Wang, Z. Zhang, L. Yu and Y. Wang, "Investigation of a Variable-Speed Operating Doubly Salient Brushless Generator for Automobile On-Board Generation Application," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015.
- [5] D. Staton, A. Boglietti and A. Cavagnino, "Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis in Small and Medium Size Industrial Induction Motors," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 620-628, Sept. 2005.
- [6] Christian Kral, Habetler T G, Harley R G. Rotor Temperature estimation of squirrel-cage induction motors by means of a combined scheme of parameter estimation and a thermal equivalent model[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(4): 1049-1056.
- [7] Wenying Jiang, Thomas M. Jahns, "Coupled Electromagnetic - Thermal Analysis of Electric Machines Including Transient Operation Based on Finite-Element Techniques," *IEEE Trans on Industry Applications*, vol. 51, no.2, 1880-1889, Mar. 2015.
- [8] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, and C. Mejuto, "Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 871 - 882, Mar. 2009.
- [9] J. Saari, "Thermal analysis of high-speed induction machines," Ph.D. dissertation, Lab. Electromechan., Helsinki Univ. Technol., Espoo, Finland, 1998.
- [10] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 1990.
- [11] Li Weili, Ding Shuye, Jin Huiyong. "Numerical calculation of large synchronous generator stator temperature fields based on coupled fields", *Proceedings of the CSEE*, 25(13):129-134, 2005.