

基于分布式发电的单相双凸极直流发电机原理 和时步有限元分析

万伟悦, 严仰光, 孟小利

(南京航空航天大学 电气工程系, 江苏 南京 210016)

摘要: 分布式发电(DG)是指在公共电力系统中的关键部位或在用电负载处使用小型发电机(组)供电的模式,合理发展分布式供电有利于节约能源和保护环境。文章提出单相双凸极直流发电机作为小型清洁能源分布式直流电源系统的主发电机,其结构简单、功率重量比高、转速高,可以起到简化系统、降低成本、提高可靠性的作用。首先介绍了该型电机的原理和构成方法,然后运用时步有限元法对发电机进行电磁计算,分析、比较了电励磁、永磁单相4极/6极(定子极数/转子极数)双凸极直流发电机和三相电励磁6极/4极双凸极直流发电机的外特性和功率曲线,以及电励磁单相4极/6极双凸极直流发电机的3种发电方式的外特性和功率曲线,最后分析并仿真验证了减小输出电压脉动的方法。

关键词: 单相双凸极直流发电机; 时步有限元法; 分布式发电; 发电方式; 电枢反应

中图分类号: TM331

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)06-0015-07

The Principle of Single-phase Doubly Salient DC Generator for Distributed Generation and its Transient FEM Analysis

WAN Wei-yue, YAN Yang-guang, MENG Xiao-li

(Department of Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: Distributed Generation (DG) means the way to supply electric power by small-scale generators in some key parts of the public power system or near the electricity load. Proper development of DG is beneficial to economizing on energy consumption and protection environment. This paper proposes single-phase Doubly Salient Generator (DSG) as the major generator of the small-scale distributed DC power supply system due to the compact construction, high ratio between power and weight and high speed, which can simplify the system, reduce the cost and improve the reliability. First, the principle and topology of this type are introduced—then electromagnetic computation for this machine with transient Finite Element Method (FEM) is implemented. The external characteristics and output power characteristics of wound field and permanent magnet 4 poles /6 poles single phase DSGs and wound field 6 poles /4 poles three phase DSG are analyzed and compared respectively, even including the three generation methods of wound field 4 poles /6 poles single phase DSG. At last, the output-ripple-voltage reduction methodology is simulated and verified..

Key words: single-phase doubly salient generator; transient FEM; distributed generation; generation mode; armature reaction

0 引言

分布式发电(DG)是指在公共电力系统中的关键

部位或在用电负载处使用小型发电机(组)供电的模式。分布式发电可以现场供电,向某一地区的局部用户提供高质量电能,也可以与电网连接,同时起到无功补偿和调控的目的。分布式发电机制灵活,既能采用直流发电系统,又能采用单相、三相、五相、六相等交流供、配电方式,额定功率从数千W至几十MW不等。

收稿日期: 2010-10-06

作者简介: 万伟悦(1984-),男,研究生,主要从事电机设计的CAD技术、分布式发电系统、飞机供配电系统等方面的研究。

中央发电厂发电通常利用化石燃料、大型水能以及核能等,经过长期的发展其燃料利用率逐步提高,但中央发电厂陆地建设投资大,建设周期长、费用高,且输电距离远、电压损失大,NO_x和温室气体排放量大;与之相比,分布式发电主要利用可再生清洁能源(包括小型水能、太阳能、地热能、生物能等)以及化石燃料,其建设时间短、投资少,发电机离负载近,输电成本低,也更环保,但燃料利用率仍不高。

随着电力科技和相关学科的发展,燃气轮机、微型高速涡轮机先后取代往复发动机用于分布式发电,燃料电池不断普及,这些技术的进步有效提高了分布式发电的燃料利用率。对发热设备投入较少的追加成本,实施热电联产(CHP)可以使分布式发电的小型设备比同类大型中央发电厂设备的燃料利用率更高。

同时,降低小型发电机的发电成本,研制高性能的新型微特发电机也是推广分布式发电的重要条件。近年来,将线性横向磁通永磁发电机用于转化潮汐能为电能的分布式发电系统,功率可达4 MW^[1];将轴向磁通永磁同步发电机用于直驱式风力发电机组,既能降低噪声,又适于低速运行^[2];科技界又提出了无铁心、径向磁通直驱式永磁风力发电机,其定转子采用轮毂轮轴结构,发电效率可高达90%以上^[3];一种适用于分布式小规模风能系统的特殊结构永磁发电机,因采用了外转子形式和气隙环形电枢绕组,没有定位力矩和铁损^[4]。此外,在发展中国家的偏远地区,投入一定的资金,采用单相感应发电机和单相发电、传输、分配系统,可以使更广大的地区用上电^[5]。

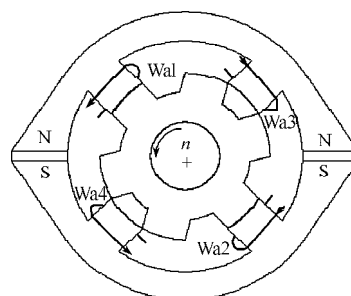
本文提出的单相双凸极直流发电机,作为中小功率清洁能源分布式直流发电系统的主发电机,具有结构简单坚固、重量轻、功率重量比高、可靠性高和可维护性好的特点。该发电机转子上无永磁磁钢,也无励磁绕组,仅需用硅钢片叠压制成,可以达到很高的转速;电枢绕组和励磁线包各一套,均安装在定子槽内。转子由利用可再生清洁能源的原动机带动,产生的电能不是向工业电网输送,而是直接向污水净化、电解水制氢制氧、盐化工业、铝镁制备和水加温等高能耗设备供电,故简化了发电系统。由于污水净化、电解水、盐化工业、铝镁冶炼等使用的是直流电,因而可省去逆变器或变频器,这样每度电的电价可进一步降低,分布式发电系统的可靠性进一步提高。

1 基本原理

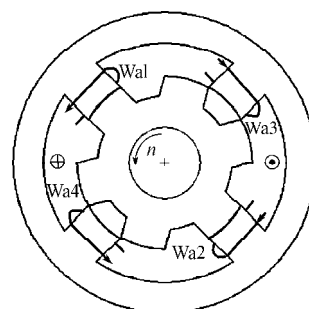
1.1 电机原理和静态参数

4极/6极(定子极数/转子极数)永磁和电励磁双凸

极电机结构如图所示。转子6个极,旋转一周为360°×6=2160°电角度,定子极距为2160°/4=540°电角度,定子极弧系数取 $\alpha\tau=1/3$,定子极弧宽度为180°电角度,转子极弧应大于或等于180°电角度。相对两定子极的电枢绕组电动势相位差为0°,相邻两定子极的电枢绕组电动势相位差为180°,故相对两定子极的电枢绕组Wa1和Wa2、Wa3和Wa4分别正向串联,构成的电枢元件Wa1Wa2和Wa3Wa4之间反向串联,以使相电动势最大。



(a) 永磁
(a) Permanent magnet



(b) 电励磁
(b) Wound field

图1 4极/6极单相双凸极电机结构简图

Fig. 1 The construction of the 4 poles / 6 poles single phase doubly salient machine

图1中,电枢绕组Wa1和Wa2所在的定子极与转子极对齐,气隙用 δ 表示,若不计导磁材料磁阻,气隙 δ 的磁导 λ_1 为:

$$\lambda_1 = \frac{\mu_0 S}{2\delta} \quad (1)$$

式中: μ_0 ——空气导磁系数, S ——定转子极对齐时的气隙面积。

设电机定子内径为 D ,铁心有效长度为 l ,则 $S=\pi D l / 12$ 。电枢绕组Wa3和Wa4所在的定子极刚好与转子槽对齐,设定子极表面与转子极槽底之气隙为 δ_2 ,不计边缘磁场,气隙 δ_2 的磁导 λ_2 为:

$$\lambda_2 = \frac{\mu_0 S}{2\delta_2} \quad (2)$$

λ_1 为气隙磁导最大值, λ_2 为最小值。定义此刻为 $\theta=0^\circ$,转子反时针旋转,电枢绕组Wa1和Wa2所在的定

子极下气隙磁导从最大值开始减小,旋转一周该极的气隙磁导交替出现6次最大值和6次最小值,该极的磁通大小也交替变化6次,双凸极电机的6个转子极相当于同步电机的6对极,故电机频率 f 为:

$$f = \frac{P_r n}{60} \quad (3)$$

式中: P_r ——转子极数; n ——电机转速。

设励磁电流为 I_f ,励磁线圈为 W_f 匝,励磁磁势 $F_f = I_f W_f$ (安匝),不计铁心磁压降,气隙磁通 ϕ 为:

$$\phi = I_f W_f \lambda \quad (4)$$

式中: λ ——电机气隙磁导,是转子位置角的函数。

设每个定子极上电枢绕组为 N 匝,电枢元件 $W_{a1}W_{a2}$ (或 $W_{a3}W_{a4}$)匝链的磁链 ψ 为:

$$\psi = 2NW_f I_f \lambda \quad (5)$$

电枢元件中感应出电动势 e :

$$e = -2W_p W_f I_f \omega_c \frac{d\lambda}{dt} \quad (6)$$

式中:电角速度 $\omega_c = d\theta/dt$ 。

对应图1中转子开始离开电枢绕组 W_{a1} 和 W_{a2} 所在的定子极,其感应电动势 e 试图阻止磁链的减小,图中箭头所示为电动势方向。设 W 为电枢元件 $W_{a1}W_{a2}$ 串联总匝数 $\theta=0^\circ$ 时,其电感为:

$$L_{\sigma 1 \max} = \frac{\mu_0 W^2 S}{2\delta} \quad (7)$$

$\theta=180^\circ$ 时,

$$L_{\sigma 1 \min} = \frac{\mu_0 W^2 S}{2\delta_2} \quad (8)$$

励磁绕组的自感在不计铁心饱和时可近似表示为:

$$L_f = \frac{\mu_0 W_f^2 S}{2\delta} \quad (9)$$

励磁绕组电感与转子位置无关,故转子的转动不会在励磁绕组中产生感应电动势,这是构成电励磁双凸极电机的主要条件之一。

1.2 单相双凸极电机拓扑族

4极/6极单相双凸极电机在同类电机中结构最简单,称为单元电机,有永磁励磁和电励磁两种形式(图1)。单相多单元双凸极电机有多种,根据一定的构成原则(气隙、定子极弧长度保持不变,电枢内径按比例扩大)将2台相同尺寸的4极/6极双凸极电机组合得到8极/12极双凸极电机,由于2块永磁体等效于1个励磁线包,可用4块永磁体或2个励磁线包或两块永磁体和1个励磁线包来励磁。对于2个励磁线包的8极/12极双凸极电机,改用一个励磁线包来励磁,即一个励磁线包跨4个定子极,因励磁磁路磁导的增大,定子轭和转子轭也应相应扩大一倍左右,以防铁心局部饱和。

以此类推,3个4极/6极双凸极电机可构成12极/18极双凸极电机,4个4极/6极双凸极电机可构成16极/24极双凸极电机。除单纯使用永磁励磁和电励磁外还可以构成混合励磁结构。以16极/24极双凸极电机为例,使用3个励磁线包和2块永磁体,调磁能力强;4块永磁体和2个励磁线包的调磁能力较弱,但能使气隙合成磁场等于0;6块永磁体和1个励磁线包的调磁能力差,且不能使气隙合成磁场为0。

此外为了提高功率密度,电机的气隙磁密应接近铁心的饱和磁感应,硅钢饱和磁感应约1.8 T,铁钴镍软磁合金(1j22)的饱和磁感应为2.4 T,但稀土永磁的剩磁感应仅在1T左右,因此永磁体的截面积应为电机定子轭导磁体截面积的1.8~2.4倍(图1(a))。

1.3 时步有限元仿真方法

本文用时步有限元法对磁场、机械运动和电路进行耦合分析,可以准确地计算单相双凸极直流发电机的磁场,在考虑了铁心磁路的非线性饱和、边缘磁场和集中式电枢绕组电枢反应这三个因素的影响的前提下,直接求解电机的运行性能。为了突出其主要矛盾,电磁计算时仍作如下假设:

- (1)使用二维时步有限元法,剖分时使用六节点三角元、二次插值,静止和旋转部分边界处使用运动边界法^[6];
- (2)铁心冲片材料1j22的磁滞效应很小,使用完全磁化曲线,即忽略磁滞;
- (3)忽略铁心的涡流损耗;
- (4)忽略电枢绕组和励磁绕组引起的端部效应、线圈内的涡流和集肤效应;
- (5)电机采用全域求解,定子外表面₁、转轴与转子边界₂均采用狄里克莱边界条件,即指定边界处无量磁位 A 为0 Wb/m,从而忽略电磁散射。

二维时步有限元分析的边值问题为:

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + \sigma v \times \nabla \times A \\ A|_{\Gamma_1} = 0, A|_{\Gamma_2} = 0 \\ A|_{\Gamma_{s1}} = A|_{\Gamma_{s2}}, A|_{\Gamma_{r1}} = A|_{\Gamma_{r2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: μ ——磁导率; A ——矢量磁位; J_s ——电流密度; σ ——介质的电导率; V ——电(势)位; v ——机械运动速度。

用于电磁计算和比较分析的4极/6极单相永磁双凸极直流发电机(表1中简称为I型)、4极/6极单相电励磁双凸极直流发电机(表1中简称为II型)及三相6极/4极电励磁双凸极直流发电机(表1中简称为III型)的基本结构参

数见表1。

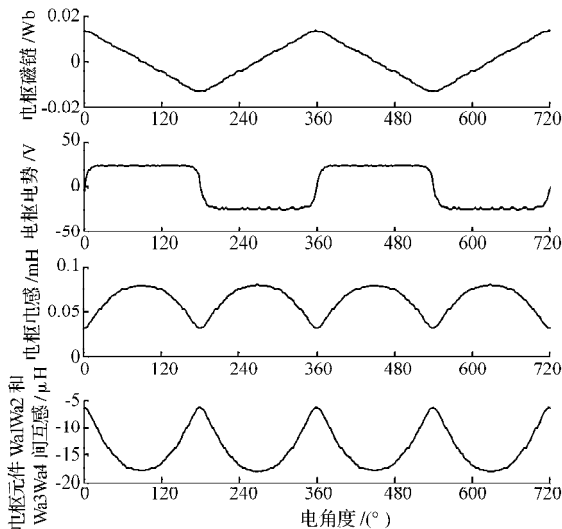
表1 双凸极直流发电机的结构参数

Tab. 1 The structure parameters of three doubly salient DC generators

	I 型电机	II 型电机	III 型电机
定子极数	4	4	6
转子极数	6	6	4
电机相数	1	1	3
电枢内径/mm	111.5	111.5	111.5
定子极高/mm	21	21	21
定子轭高/mm	19	19	19
电枢外径/mm	191.5	191.5	191.5
气隙/mm	0.25	0.25	0.25
转子外径/mm	111	111	111
转子极高/mm	13	13	13
转子轭高/mm	20	20	20
转子内径/mm	45	45	45
铁心长度/mm	70	70	70
铁心材料	lj22	lj22	lj22
励磁元件数	2*	1	1
励磁元件匝数	/	100	100
每极电枢匝数	2	2	4
电枢每相串联匝数	8	8	8
电机转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	4 200	4 200	4200
电机频率/Hz	420	420	280

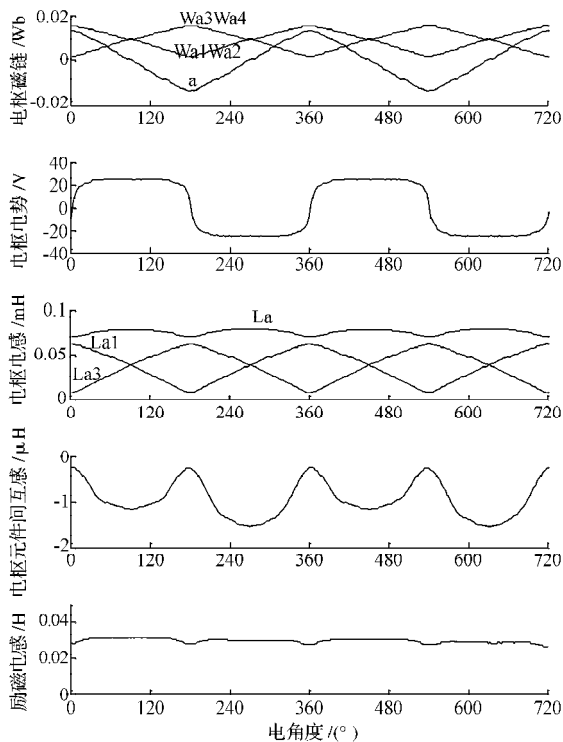
* 钕铁硼永磁体 $B_r=1.1 \text{ T}$, $H_c=960 \text{ A/mm}$, 尺寸为 $70 \text{ mm} \times 58 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。

根据单相双凸极电机的基本原理和相关静态参数,使用时步有限元法求解得到空载下发电机关键静态参数波形(图2)。钕铁硼和钕钴等稀土永磁体的去磁曲线为直线,永磁体的导磁率和空气的导磁率大致相同,在定子铁心中插入永磁体,使铁心的磁阻显著加大。因此,电机铁心的结构尺寸相同和电枢绕组的匝数相同时,永磁电机的电枢电感比电励磁电机的小,相绕组间的互感则比不饱和的电励磁电机的大。



(a) 永磁($n=4\ 200 \text{ r/min}$)

(a) Permanent magnet ($n=4\ 200 \text{ r/min}$)



(b) 电励磁($F_r=1\ 000 \text{ A}$, $n=4\ 200 \text{ r/min}$)

(b) Wound field ($F_r=1\ 000 \text{ A}$, $n=4\ 200 \text{ r/min}$)

图2 单相双凸极电机静态参数波形

Fig. 2 The simulation waveforms of the single phase doubly salient machine's static characteristics

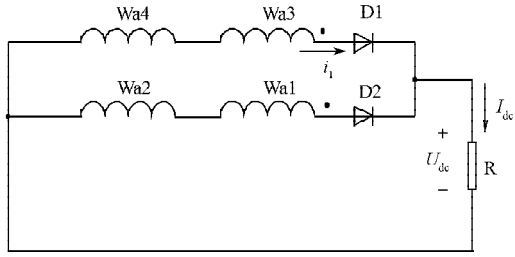
2 电机运行分析与比较

2.1 工作模式和电枢反应

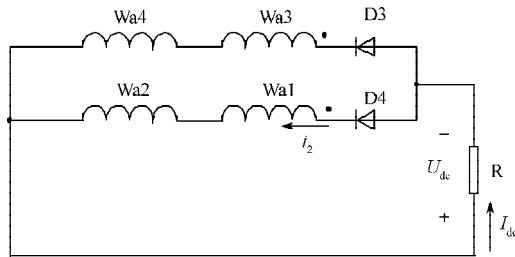
单相双凸极电机的电枢元件与静止整流桥相接,构成无刷直流发电机,其有3种负载工作方式(图3)。图3(a)中二极管D1、D2和图3(c)中D5、D7为共阴极整流管;图3(b)中二极管D3、D4和图3(c)中D6、D8为共阳极整流管。4极/6极电励磁单相双凸极电机反时针旋转,且励磁电流方向如图4(b)所示,若电枢元件Wa1Wa2和Wa3Wa4的“ ”端分别接二极管D1、D2的阳极(图3(a)),图中转子极正在离开电枢元件Wa3Wa4所在的定子极,电枢元件Wa3Wa4的“ ”端电动势为正,在外电路接通时该电枢元件的电流就经二极管D1流向负载电阻R。此时电枢元件Wa1Wa2的“ ”端电动势为负,二极管D2反偏没有电流流过。仅当转子极和定子极对齐后,电枢元件Wa1Wa2的感应电势反向,才有电流经二极管D2流入负载。电枢元件Wa3Wa4的电动势同时因转子极进入定子极而反向,二极管D1截止。电枢元件Wa3Wa4和Wa1Wa2轮流导通。当电枢元件Wa3Wa4通过电流时,该电流产生的磁力线如图4(a)所示,与励磁磁势的磁力线(图4(b))同方向,具有增大励磁磁场的作用,其合成磁场见图4(c)。这种仅在转子极离开定子极时才向负载供电

的发电方式和开关磁阻发电机的发电方式相同, 本文称为开关磁阻发电方式(srg发电方式)。电枢电流具有增磁作用, 为增磁电枢反应。

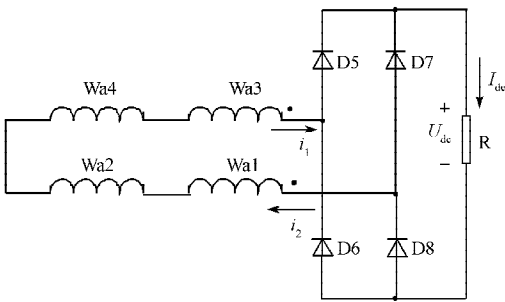
电枢元件才有电流流向负载, 这种发电方式本文称为第一种双凸极发电方式(dsg1发电方式), 其电枢反应磁场削弱了励磁磁场, 为去磁电枢反应。



(a) srg 发电方式
(a) Srg generation mode



(b) dsg1 发电方式
(b) Dsg1 generation mode

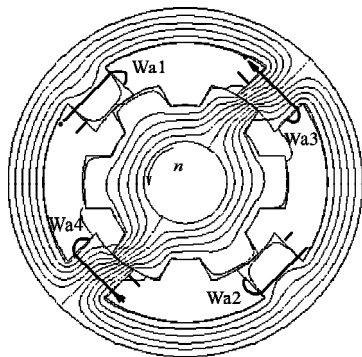


(c) 单相桥发电方式
(c) Single-phase-rectifier generation mode

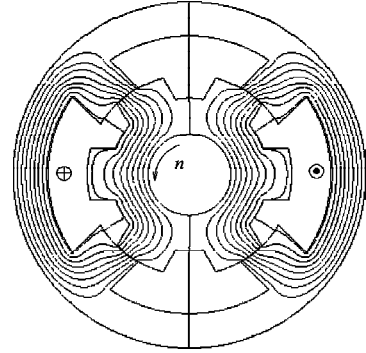
图3 单相双凸极电机的3种发电方式

Fig. 3 Three generation modes of the single-phase doubly salient machine

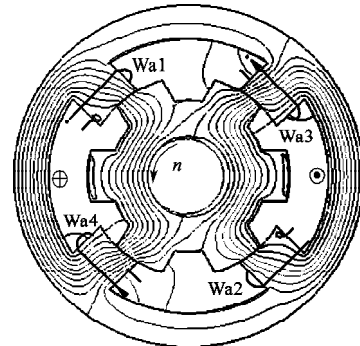
若二极管的接法与上述相反(图3(b)), 则电枢元件 Wa1Wa2和Wa3Wa4仅在转子极滑入相应的定子极时,



(a) 电枢反应磁场
(a) Armature reaction field



(b) 励磁磁场
(b) Exciting field

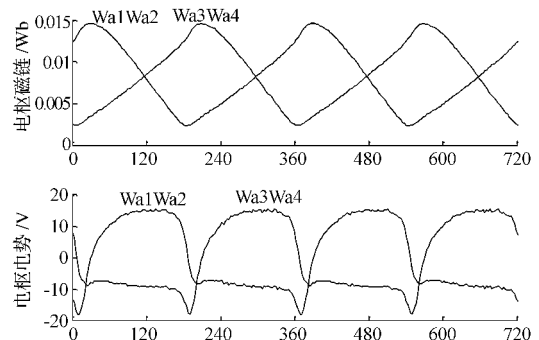


(c) 合成磁场
(c) Compound field

图4 单相双凸极电机 srg 发电方式磁场分布
($F_f=2000\text{ A}$, $n=4200\text{ r/min}$)

Fig. 4 The magnetic field of the single phase doubly salient machine in srg generation mode ($F_f=2000\text{ A}$, $n=4200\text{ r/min}$)

图3(c)中两电枢元件 Wa1Wa2和Wa3Wa4串联后和单相整流桥相接。此时不论是转子极进入定子极或滑离定子极, 电机均向外电路提供电流, 即电枢绕组的正负半周都有电流流通, 本文称为双凸极发电机的单相桥发电方式。转子极滑出定子极, 其电枢电流引起增磁电枢反应; 转子极进入定子极, 其电枢电流引起去磁电枢反应, 这两种电枢反应同时存在。由于磁路饱和, 电枢反应增磁量小于去磁量, 总体为去磁电枢反应, 阻性负载下稳态波形如图5所示。



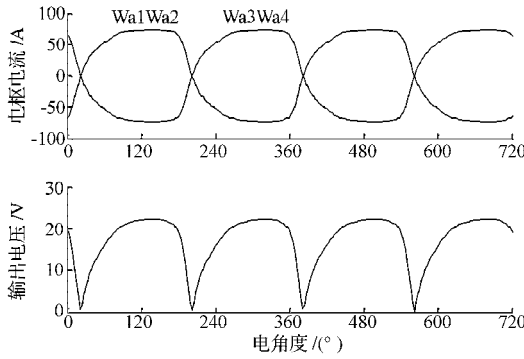


图5 负载稳态运行波形($F_f=1\ 000\ \text{A}$, $R=0.3$, $n=4\ 200\ \text{r/min}$, 单相桥发电方式)

Fig. 5 The simulated waveforms of wound field DSG's static operation under real resistor load ($F_f=1\ 000\ \text{A}$, $R=0.3$, $n=4\ 200\ \text{r/min}$, single-phase-rectifier generation mode)

2.2 运行特性和比较

图6给出了在相同转速下,4极/6极单相双凸极直流发电机单相桥发电方式和三相6极/4极双凸极直流发电机接全桥整流时的空载特性曲线。

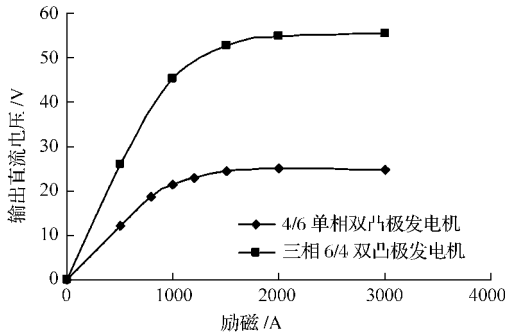
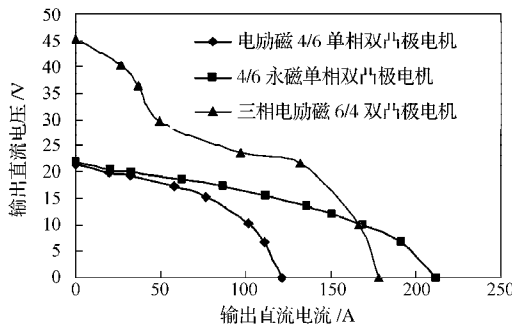


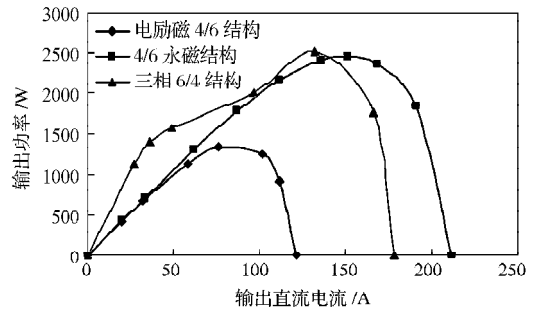
图6 4极/6极单相和6极/4极三相双凸极直流发电机的空载特性($n=4\ 200\ \text{r/min}$)

Fig. 6 No-load characteristics of the 4 poles / 6 poles single phase DSG and 6 poles / 4 poles three phase DSG ($n=4\ 200\ \text{r/min}$)

图7给出在相同励磁安匝(单相电励磁电机和永磁电机的空载点相同)相同转速下,4极/6极电励磁和永磁单相双凸极直流发电机单相桥发电方式、三相6极/4极双凸极直流发电机接全桥整流发电时外特性曲线和功率曲线。由图可见,单相双凸极直流发电机的外特性比三相双凸极发电机的硬,三相双凸极发电机在轻载区由于换



(a) 外特性曲线
(a) External characteristics



(b) 功率曲线

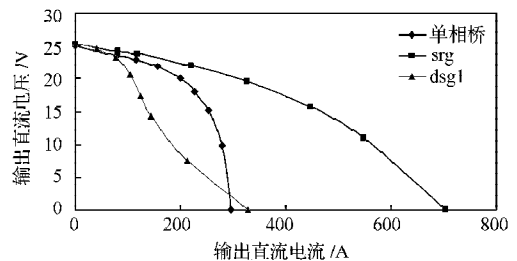
(b) Output power characteristics

图7 4极/6极双凸极直流发电机(电励磁、永磁)和6极/4极双凸极直流发电机的外特性($F_f=1\ 000\ \text{A}$, $n=4\ 200\ \text{r/min}$)

Fig. 7 Output characteristics of the 4 poles / 6 poles DSG (wound field, permanent magnet) and 6 poles / 4 poles DSG ($F_f=1\ 000\ \text{A}$, $n=4\ 200\ \text{r/min}$)

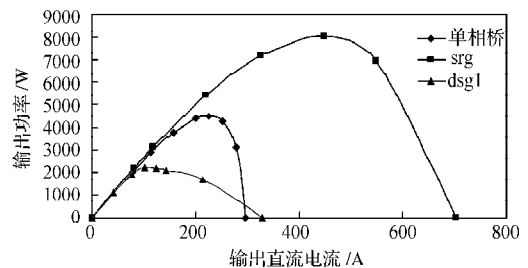
相重叠电压损失较大而外特性下降较快;永磁单相电机比电励磁单相电机的外特性更为平坦,其电压调整率更小,短路电流更大。永磁单相直流发电机的最大输出功率与三相双凸极发电机相当,大于电励磁单相电机的。

图8给出相同转速和相同励磁安匝、采用不同的发电方式时,单相双凸极直流发电机的外特性和功率曲线比较。为了使电机空载电动势相等,srg和dsg1发电方式的电枢绕组串联匝数应增加一倍。单相双凸极电机srg发电方式在更大的负载电流范围内具有较小的电压调整率,短路电流最大,输出功率较高。3种发电方式在轻载区其外特性曲线几乎是重合的,dsg1发电方式在较小



(a) 外特性曲线

(a) External characteristics



(b) 功率曲线

(b) Output power characteristics

图8 4极/6极单相双凸极直流发电机不同发电方式的外特性($F_f=2\ 000\ \text{A}$, $n=4\ 200\ \text{r/min}$)

Fig. 8 Output characteristics of the 4 poles and 6 poles single phase DSG with the different generation modes ($F_f=2\ 000\ \text{A}$, $n=4\ 200\ \text{r/min}$)

的负载电流时外特性即快速下降,其输出功率较小。

2.3 降低输出电压脉动的方法

单相双凸极直流发电机的输出电压脉动很大(图5),有时不能满足用电设备的要求。降低输出电压脉动主要有3种方法:

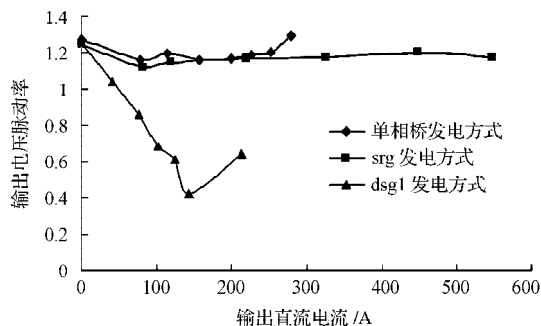
(1)直流发电机输出端并接滤波电容。对于发电机低压大电流输出,所需电容容量过大,不仅体积重量大,而且降低了寿命和可靠性。

(2)采用组合电机。在同一电机壳体内设多台相同的双凸极电机,其定子极相互对齐共用励磁绕组,转子极错开一定的角度。各套电枢绕组接整流桥,整流桥的输出端并接于汇流条上(或通过平衡电抗器并接)。此

方案特别适合低压大电流场合,如电解水,所需电压在几十伏左右、电流从几十安至上千安不等。实际运用时可接滤波器,进一步降低脉动。

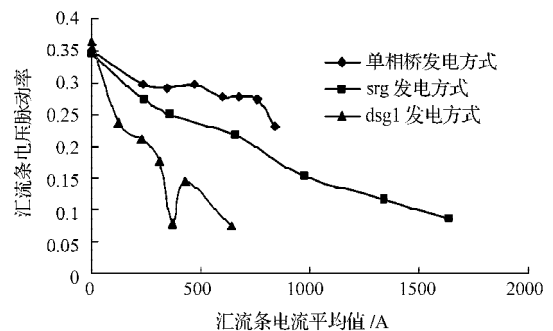
(3)采用双定子结构,转子的上下齿错开相应的角度。此方案原理与第2种方法的类似,电机构造较为复杂。

本文采用第2种方案,将3台单相双凸极直流发电机输出端并联,转子极错开 60° 电角度。假设电压调节点至并联汇流条的正接线电阻相同,3台直流发电机的空载电压和外特性相同,仿真验证了降低输出电压脉动的效果(图9)。



(a) 单台单相双凸极直流发电机输出电压脉动率

(a) The ripple rate of output voltage for a single phase DSG



(b) 转子极互错 60° 并联后输出电压脉动率

(b) The ripple rate of output voltage for three single phase DSGs with their rotors crossed by 60°

图9 输出电压脉动率比较($F_f=2\ 000\text{ A}$, $n=4\ 200\text{ r/min}$)

Fig. 9 The comparison of the ripple rate of output voltage ($F_f=2\ 000\text{ A}$, $n=4\ 200\text{ r/min}$)

3 结语

本文介绍了分布式发电的概念和特点,并提出在清洁能源小型分布式直流电源系统中使用单相双凸极直流发电机。该电机转子上无永磁磁钢,也无励磁绕组,结构简单、转速高、可靠性高,工作原理清晰,构成方法较多。

本文使用时步有限元法对该型电机进行电磁计算,考虑了铁心磁路的非线性饱和、边缘磁场、集中式电枢绕组电枢反应等因素的影响,计算结果准确。分析计算数据可知,单相双凸极直流发电机的外特性较硬,有较优的电压调整率,永磁单相电机的外特性比电励磁电机更平坦,输出功率更大;该直流发电机有单相桥、srg、dsg1 3种发电方式,其电枢反应各不同,srg发电方式外特性最平坦,输出电流大,输出功率高;单相桥发电方式居中;dsg1发电方式外特性下降最快,输出功率小。

本文还简要分析了3种降低单相双凸极直流发电机

输出电压脉动的方法,仿真验证了转子极互错 60° 电角度的组合电机能够有效地降低输出电压脉动率。

参考文献:

- [1] Mats L, Hans B, Olov A, et al. Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by PM linear generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(1): 219-224.
- [2] Muljadi E, Butterfield C P, Wan U H. Axial flux modular permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1999, 35(4): 831-836.
- [3] Spooner E, Gordon P, Bumby J R, et al. Lightweight ironless-stator PM generators for direct-drive wind turbine[J]. IEEE Transactions on Electric Power Applications, 2005, 152(1): 17-26.
- [4] Chan T F, Lai L L. An axial-flux permanent magnet synchronous generator for a direct-coupled wind turbine system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 86-94.
- [5] Durhan M O, Ramakumar R. Power system balancers for an induction generator[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1987, IA-23(6): 1067-1072.
- [6] 胡敏强, 黄学良. 电机运行性能数值计算方法及其应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003.