

新型双馈变速凸极同步电机

宁玉泉

(华中科技大学 武汉 430074)

[摘要] 提出一种新型双馈变速凸极同步电机,阐述了它的基本原理和结构,电机的转子采用分裂磁极和正交绕组,结构简单、可靠。转子绕组由低频交流变频电源供电,使电机具有变速恒频的特性。通过原型样机的试验,验证了该项发明的正确性和实用性,它将在大型水电、风电中得到广泛应用。

[关键词] 凸极同步电机 变速恒频 交流励磁 双馈

[中图分类号] TM341 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)12-0027-05

1 前言

在抽水蓄能电站中,为了提高机组效率,蓄能机组作电动机—水泵运行时,其转速略高于发电机工况时的转速为宜,要求电机应具有变速功能。若采用可变速电机,在发电机运行时,使水轮机始终处在最佳工况下运行,可提高效率3%~10%^[1],且在轻载下也能稳定运行,而不致产生震动。在水泵运行时,可实现输入功率调整,控制抽水工况负荷,从而控制电网的频率波动。

我国大部分河流多泥沙,水头变化大。长期以来,水轮机行业苦于无法解决由于汛期泥沙多而造成的水轮机转轮选型的困难。如采用可变速电机,可使水轮机无论在丰水期或枯水期都能处于最佳工况下运行。大大减少水轮机叶片气蚀与泥沙磨损,既提高了机组综合效率,又延长了机组寿命^[2]。

在大型水电站高坝建设中,往往希望二期开发。若采用可变速电机,可适应水轮机转速在比较大的范围内变化,从而可实现在建设过程中低坝发电,边建设边发电,取得巨大的经济效益,在西部水电开发中,尤具特殊意义。

在风力发电中,变速恒频是其关键技术,特别是对于取消减速器装置的风力发电机,采用可变速的风力发电机,尤有特殊意义。对于新能源的潮汐发电,潮起潮落,也希望采用可变速同步电机。

在大型交流传动中,如大型轧钢电机,若采用交流变频同步电机,变频器的功率与电机的功率相同,价格昂贵。若采用作者提出的专利技术,使变频器的功率大为减小,机组的成本可大大降低。

随着电力工业的发展,大功率长距离输电日益增多,当系统处于低负荷时,就必须进行无功补偿和调节。若同步电机能异步化运行,即能进行快速无功补偿和调节,必将提高电网质量和系统的稳定性,这是当前我国电力工业所面临的重大问题。

1992年国际大电网会议上,第11旋转电机学术委员会全体会议讨论认为新型变速同步电机应作为“电机的新发展和经验”的第一优先主题。前苏联、日本等国学者作了专题报告^[1],日本日立公司于1987制造容量为22MVA的成出(Narude)电站1号机投入运行;东芝公司制造容量为85MVA的八木泽(Yagisawa)电站2号机,于1990年12月投入运行,成为世界首台变速抽水蓄能机

[收稿日期] 2004-01-20; **修回日期** 2004-04-03

[基金项目] 国家“八六三”计划基金资助项目(2001AA512050)

[作者简介] 宁玉泉(1942~),男,浙江绍兴市人,华中科技大学教授。参加“八六三”计划该项目的研究人员:韦忠朝、季炜、涂光瑜、陆继明、杨的先、吴彤

组^[3,4]；1994年，日本日立公司制造容量为400 MW的大河内电站变速抽水蓄能机组投入运行^[5]。前苏联第一台200 MW (ASTG-200) 异步化汽轮发电机于1985年制造并投入运行^[6]。2002年在国际大电网会议上，重申了对可变速同步电机的关注，并确认为电机发展的新方向。

90年代以来，国外对于变速同步电机的研究，主要是双馈交流励磁电机DFIM (doubly fed induction machine)，即以日本日立公司400 MW大河内电站为代表的双馈交流励磁电机^[5]。在结构和本质上，它是绕线式异步电机。在大型水电及抽水蓄能机组中，由于转子直径达十几米，转速高，离心力大，致使转子绕组的端部固定变得十分困难。为解决此难题，日本学者在转子结构上提出了一系列的发明专利。

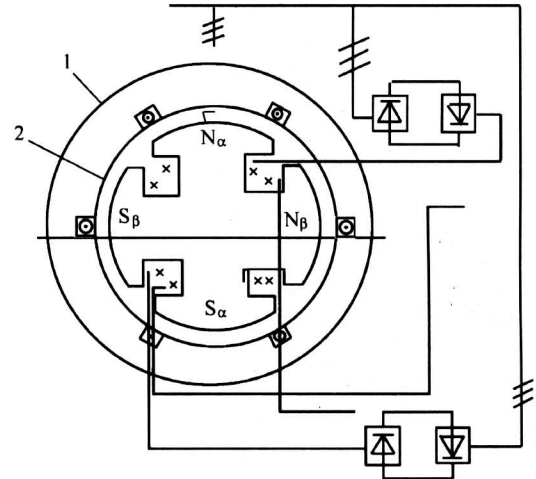
基于上述分析，可变速同步电机理论研究，是当今电机的新发展，是一个重要的基础性研究课题。无论从经济上，还是从技术上，我国应自行研制，走出一条新路。作者经多年的研究，提出一种新型可变速电机——双馈变速凸极同步电机，并申报了国家发明专利（专利申请号01128351.3）^[7]。

2 双馈变速凸极同步电机核心技术的特点

双馈变速凸极同步电机采用双馈原理，具有典型的凸极同步电机结构。定子具有 p 对极，由正常工频电源馈电，与普通交流电机相同。转子采用分裂凸极转子结构，具有 $2p$ 对磁极，其上装有励磁绕组和阻尼绕组，转子 $2p$ 对磁极绕组构成二相（或四相） p 对极正交绕组。磁极绕组由低频交流变频电源供电，二相绕组在空间上，按相差 90° 电角度分布，在时间上，相差 90° 电角度，产生圆形旋转磁场。双馈正交分裂磁极变速凸极同步电机的结构，详见图1。

与传统的凸极同步电机相比，定子结构相同，主要的区别在于转子采用分裂磁极、正交励磁绕组，转子励磁绕组是由低频交流变频电源供电。作者提出的新型变速同步电机，关键在于将气隙磁场同步旋转速度与转子旋转速度分离。在转子励磁绕组中，通以交流变频电流，产生可变速的圆形旋转磁场。转子绕组产生的气隙磁场旋转速度为转子旋转速度与转子绕组产生的圆形旋转磁场相对转子运动的速度之和。当改变励磁绕组中交流变频电源频

率时，转子旋转速度将发生相应的变化；或者当转子旋转速度发生变化时，相应地改变转子绕组的交流变频电源频率，实现凸极同步电机变速恒频，从而构成双馈变速凸极同步电机。



1—定子 ($2P=2$)；2—转子： N_α 、 S_α 为转子 α 相绕组的磁极， N_β 、 S_β 为转子 β 相绕组的磁极

图1 双馈变速凸极同步电机馈电简图

Fig.1 variable speed doubly fed salient pole synchronous machine

综上所述，这种具有原始创新的新型双馈变速凸极同步电机，主要是针对大型水电机组实现凸极同步电机变速恒频。

3 双馈变速凸极同步电机变速恒频的基本原理

为分析研究方便，对于定子坐标系，设定子 U 相绕组的轴线作为坐标原点，定子空间沿圆周分布的坐标轴为 θ ，对于转子坐标系，设转子第一对磁极 N_α 的轴线作为坐标原点，转子空间沿圆周分布的坐标轴为 x ，转子以 ω_r 的速度在空间旋转，转子磁极绕组通以 ω_f 频率的电流， γ 为转子旋转坐标系相对于定子坐标系的相对位置，其坐标系如图2所示。

由定转子坐标系的关系，可以得到表达式：

$$\theta = x + \gamma, \gamma = \int_0^t \omega_r dt + \gamma_0$$

其中， γ_0 为转子第一对磁极 N_α 轴线在 $t=0$ 时的电角度，即转子初始位置角。一般可以假定认为 $\gamma_0=0$ 。当转子以均匀速度旋转时，

$$\gamma = \omega_r t, \theta = x + \gamma = x + \omega_r t$$

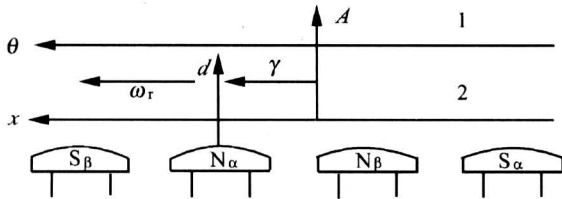
当电机定子三相绕组通过的电流为 i ，其幅值相等为 $\sqrt{2}I$ ，其频率为 ω_s ，即 $i = \sqrt{2}I \sin \omega_s t$ 。对于定子三相绕组合成磁势，根据傅里叶级数分析，可以得到定子三相绕组合成磁势的表达式：

$$F_s(\theta, t) = \sum F_\nu \sin(\omega_s t - \nu\theta)$$

$$F_\nu = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{NI}{\nu p} K_{n\nu} = 1.35 \frac{NI}{\nu p} k_{n\nu}$$

$$\nu = 6k \pm 1 \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

其中 N 为定子绕组每相每条支路串联绕组匝数， l 为定子电流的有效值。 p 为电机的极对数， ν 为谐波的级次， $k_{n\nu}$ 为电机 ν 次谐波的绕组系数， F_ν 为电机磁势 ν 次谐波的幅值。



1—定子坐标系； $F_s(\theta, t)$ 其中， A 为定子 U 相绕组的轴线； θ 为定子空间沿圆周分布的坐标轴； t 为时间变量；2—转子旋转坐标系： $F_f(x, t)$ ，其中， γ 为转子旋转坐标系相对于定子坐标系的相对位置； ω_r 为转子在空间的旋转速度； ω_f 为转子磁极绕组电流的频率； x 为转子空间沿圆周分布的坐标轴

图 2 双馈变速凸极同步电机定转子坐标系

Fig.2 The stator and rotor reference frame of doubly fed salient pole synchronous machine

对于转子励磁绕组的磁场分析，它由 α 相的磁极 N_α, S_α 及 β 相的磁极 N_β, S_β 绕组组成，励磁绕组为集中绕组，相应的匝数为 $N_{f\alpha}, N_{f\beta}$ ，并且 α, β 二相绕组的匝数均相等为 N_f ，即 $N_{f\alpha} = N_{f\beta} = N_f$ ，相应通过二相绕组的低频交流电流为 $i_{f\alpha}, i_{f\beta}$ ，其有效值相等为 I_f ，其频率为 ω_f ，其相位差为 $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$ 。

$$i_{f\alpha} = \sqrt{2} I_{fd} \sin \omega_f t = \sqrt{2} I_f \sin \omega_f t$$

$$i_{f\beta} = \sqrt{2} I_{fq} \sin(\omega_f t - \alpha) = \sqrt{2} I_f \sin(\omega_f t - \alpha)$$

$$\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$$

对于 α, β 相绕组的磁势为

$$F_{f\alpha}(x, t) = \sum F_{f\nu} \cos \nu x \sin \omega_f t$$

$$F_{f\nu} = \frac{4}{\pi} \frac{N_f I_f}{\nu p} \sin \nu \left(\frac{\alpha_p}{2} \pi \right)$$

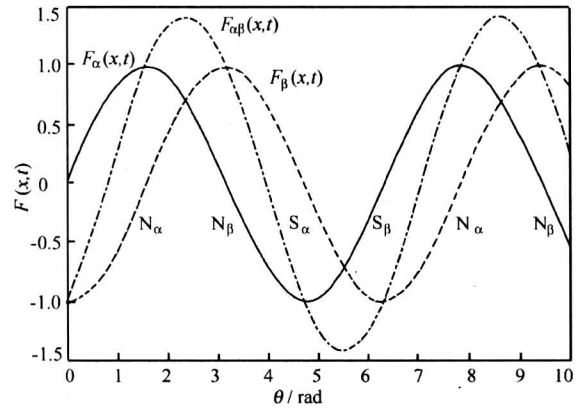
$$\nu = 1, 3, 5, \dots$$

$$F_{f\beta}(x, t) = \sum F_{f\nu} \cos \left(x - \frac{\pi}{2} \right) \sin(\omega_f t - \alpha)$$

$$F_{f\nu} = \frac{4}{\pi} \frac{N_f I_f}{\nu p} \sin \nu \left(\frac{\alpha_p}{2} \pi \right)$$

$$\nu = 1, 3, 5, \dots$$

转子 α, β 二相绕组的基波磁势分布如图 3 所示。



1—转子， N_α, S_α 为转子 α 相绕组基波磁势的波形
2—转子， N_β, S_β 为转子 β 相绕组基波磁势的波形

图 3 双馈变速凸极同步电机转子磁势波形图

Fig.3 The rotor M. M. F of doubly fed salient pole synchronous machine

转子 α, β 二相绕组的合成磁势为

$$F_f(x, t) = \sum F_{f\nu} \sin(\omega_f t - \nu x)$$

$$F_{f\nu} = \frac{4}{\pi} \frac{N_f I_f}{\nu p} \sin \nu \left(\frac{\alpha_p}{2} \pi \right)$$

$$\nu = 1, 3, 5, \dots$$

根据定转子坐标系二者的关系， $x = \theta - \omega_r t$ ，将其代入转子 α, β 二相绕组的合成磁势，得到关系式，

$$F_f(\theta, t) = \sum F_{f\nu} \sin(\omega_f t - \nu x)$$

$$= \frac{4}{\pi} \frac{N_f I_f}{\nu p} \sin \nu \left(\frac{\alpha_p}{2} \pi \right)$$

$$\nu = 1, 3, 5, \dots$$

根据机电能量转换的基本原理和定转子气隙磁场相对静止的概念，对于气隙磁场基波而言，即 $\nu = 1$ 时，瞬时功率 P_m 及电磁转矩 T_{em} 为

$$P_m = T_{em} \frac{dx}{dt} = T_{em} \omega_r$$

$$\omega_s = \omega_r \pm \omega_f$$

当 $\alpha = -\frac{\pi}{2}$ 时， $\omega_s = \omega_r + \omega_f$ ，即为正号。当 $\alpha =$

$-\frac{\pi}{2}$ 时, $\omega_s = \omega_r - \omega_f$, 即为负号。当电力系统频率恒定不变时, 即 $\omega_s = \text{const}$ 。当改变 ω_f 或 ω_r 时, 其 ω_r 或 ω_f 也相应的变化。即为 $\omega_r = \omega_s - \omega_f$ 或 $\omega_f = \omega_s - \omega_r$ 。当改变 α 时, 即可改变转子绕组产生的气隙旋转磁场 ω_f 的转向, 即可实现转子转速能够在定子绕组产生的旋转磁场旋转速度 ω_s 的上下变化。从而实现凸极同步电机变速恒频。

当转子转速 $\omega_r < \omega_s$ 时, 即转差率 $s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$, $s > 0$, 转子交流励磁电源从电网向变速同步电机供电。当 $\omega_r > \omega_s$ 时, $s < 0$, 转子交流励磁电源从变速同步电机向电网供电。从而实现双馈供电的功能及特性。

当 $\omega_f = 0$ 时, 且 $\alpha = 0$ 时, 即对转子绕组馈入直流电源时, 与传统同步电机类似, $\omega_r = \omega_s$, 电机转子转速为同步转速。

作者提出的结构, 突破了传统概念, 定转子绕组产生的气隙磁场, 仍然保持相对静止, 但将气隙磁场同步旋转速度与转子旋转速度分离, 以实现转子变速, 这在原理上和结构上的有所创新。

4 试验样机及实验分析

该变速凸极同步电机样机的设计数据如下:

功率 30 kW, 额定电压 400/231 V, 极数 $2p = 4$, 功率因数 $\cos = 0.8$, 额定频率 $f = 50$ Hz, 绝缘等级 F, 定子铁心外径 $D_o = 430$ mm, 定子铁心长度 $L = 216$ mm, 定子槽数 $\theta_1 = 48$, 气隙 $G = 1.2$ mm, 磁极极靴宽度 $b_p = 90$ mm, 磁极极身宽度 $b_m = 52$ mm, 磁轭内径 $D_{ir} = 155$ mm。试验样机如图 4, 5 所示。

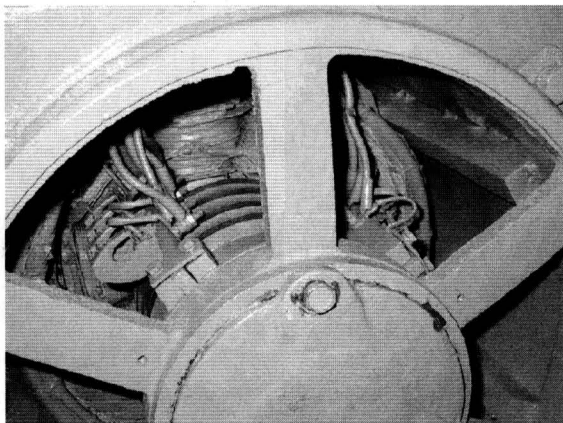


图 4 电机转子结构

Fig. 4 The structure of generator rotor



图 5 双馈变速凸极同步发电机组

Fig. 5 Novel variable speed constant frequency doubly fed salient pole synchronous machines

样机试验, 得到一系列的特性和波形。空载试验得到一族曲线, $U = f(f_f, i_f)$, (图 6)。式中 $f_f(\omega_f)$ 为交流励磁电源的频率。

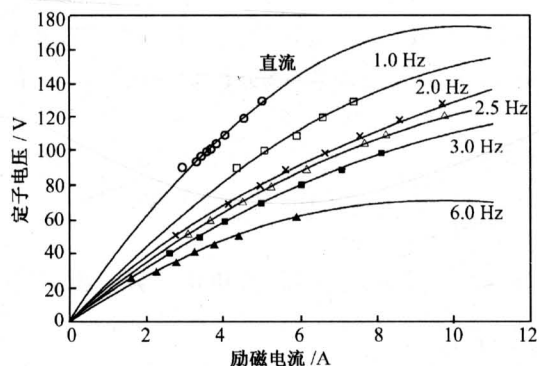


图 6 电机空载特性曲线图

Fig. 6 Noload character of machine

短路试验得到一族曲线, $I_K = F(f_f, i_f)$, 如图 7 所示。发电机并网前的空载电压波形曲线如图 8 所示。并网后加负载时, 发电机的电压和电流波形曲线如图 9 所示。

从试验中可以看出, 当改变转子交流励磁电源频率 $f_f(\omega_f)$ 时, 相应地改变转子的转速 ω_r , 保持 $\omega_s = \omega_r \pm \omega_f$ 不变。从而实现变速恒频的原理。

5 结论

通过理论分析和样机试验验证, 作者提出的双馈变速凸极同步电机, 原理正确、新颖, 结构简单、可行, 具有创新性、实用性和自主知识产权, 应用前景广阔, 必将带来一定的经济效益和社会

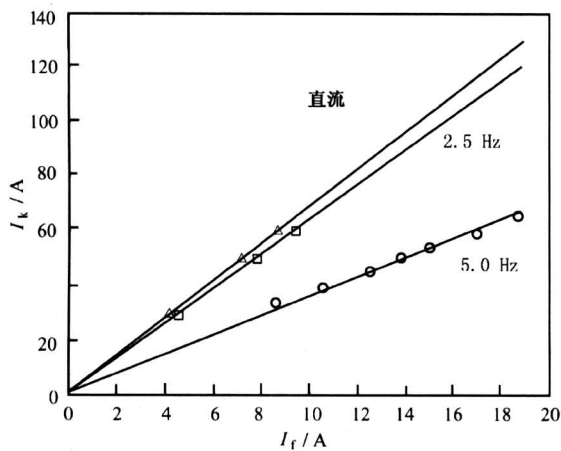


图 7 电机短路特性曲线

Fig. 7 Short circuit character of machine

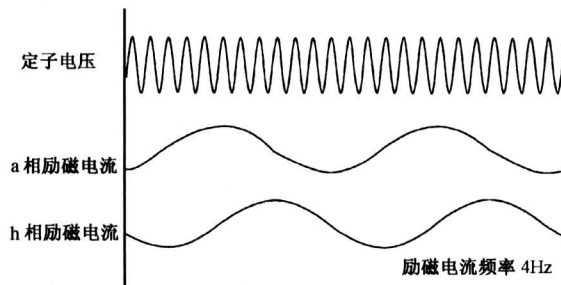


图 8 发电机空载电压波形

Fig. 8 Noload voltage waveform of generator

影响。

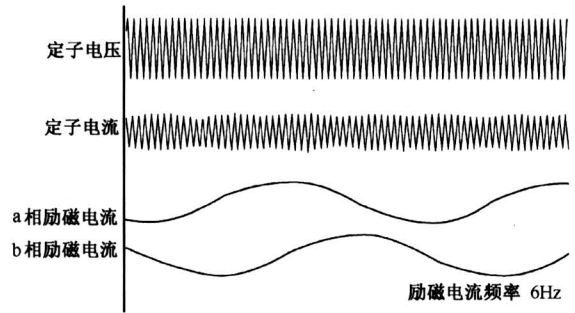


图 9 发电机并网后带负载电压电流波形

Fig. 9 Load voltage-circuit waveform of generator

参考文献

- [1] 张为杰. 国际大电网会议会刊《electra》No 144 [A]. 国外大电机, 1993, (3)
- [2] 宁玉泉. 变速同步电机的工作特性及在抽水蓄能电站的应用[J]. 大电机技术, 1994, (5): 1~5
- [3] Fauya S. 世界首台用于抽水蓄能电站的变频供发电-电动机的研制和商业运行[J]. 国外大电机, 1993, (4)
- [4] Tanaka H A. 82 MW variable speed pumped-storage system [J]. Water power & Dam construction, 1991, (11)
- [5] Eetc K. A 400 MW adjustable speed pumped-storage system [J]. Water power & Dam construction. 1991, (11)
- [6] Cheviehelov V A. 等 异步汽轮发电机的开发与应用 [J]. 国外大电机, 1993, (2)
- [7] 宁玉泉. 双馈变速凸极同步电机 [P]. 国家发明专利 (专利申请号 01128351.3)

A Novel Variable Speed Constant Frequency Doubly Fed Salient Pole Synchronous Machine

Ning Yuquan

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, .China)

[Abstract] This paper presents a novel variable speed constant frequency doubly fed salient pole synchronous machine by patent. It deals with basic theory and construction of variable speed salient pole synchronous machines, especially on variable speed constant frequency characteristics. The split salient pole and orthogonal winding are adopted in rotor. The structure of the rotor is simple and tried. Variable frequency converter at rotor supplies the excitation winding. It makes machine to achieve good character of variable speed constant frequency. Experiments show that the patent is correct and practical through prototype test. It will be widely applied to large waterpower and wind power generators.

[Key words] salient pole synchronous machines; doubly fed variable speed constant frequency; AC excited