

基于单相感应电泵的光伏扬水系统开发

徐 政¹, 李 旭¹, 陈锐坚²

(1. 清华大学深圳研究生院电力系统国家重点实验室深圳研究室, 深圳 518055; 2. 深圳天源新能源股份有限公司, 深圳 518055)

摘 要: 开发基于单相交流感应电泵的光伏扬水系统,采用常规的三相逆变电路,对单相感应电动机的主绕组和副绕组施加相位差为 90° 的PWM电压,实现对水泵宽范围的变频调速控制;提出新的母线箝位调制方法,提高直流母线电压利用率,减小电压与电流谐波,提高光伏扬水系统的运行效率;实验结果验证了所提控制方法的有效性和系统运行的稳定性。

关键词: 光伏扬水系统; 单相感应电动机; 脉宽调制; 直流母线电压利用率; 母线箝位

中图分类号: TM615

文献标识码: A

0 引 言

在光伏扬水系统的推广应用中有2个要点:一是要与现有通用型电动水泵配套,保证系列产品规格齐全、系统运行维护方便;二是要根据光照变化对水泵实施调速控制,实现系统的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)功能。

通用型电动水泵通常采用三相感应电动机驱动,对应的变频调速技术与产品成熟,是光伏扬水系统的首选。而结构简单、成本较低的单相感应电动机(single-phase induction motor, SPIM)不仅在家用电器等只采用单相电源的产品与系统中得到广泛应用,许多小功率水泵也使用SPIM。但是,由于以节能为目的的SPIM变频调速控制的性价比不高,相关研究不够深入,缺乏应用产品。文献[1]分析比较了SPIM变频调速逆变器的4种主电路形式;文献[2,3]分别提出电容中点单H型逆变器的空间矢量调制法和磁场定向矢量控制方法;文献[4,6]提出三相逆变器的两相正弦脉宽调制新方法,具有较高的直流母线电压利用率;文献[7]提出双H型逆变器的模糊控制方法。但是,上述研究成果在电路和算法的复杂性、直流母线电压利用率及逆变器成本等方面存在各自的不足,难以在光伏

扬水系统中推广应用。

本文开发能够对SPIM实施变频调速控制的光伏逆变控制器。首先,根据SPIM的结构与运行特点,对几种可行的逆变电路拓扑进行对比与分析,选择常规的三相逆变电路,对SPIM的主绕组和副绕组分别输出相位差为 90° 的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)电压;其次,为提高直流母线电压利用率,并抑制输出电压和电流谐波,提出新的母线箝位调制法。实验结果表明,新开发的光伏扬水逆变器运行稳定,可实现SPIM的宽转速范围和高效运行,最大功率点跟踪精度高,为系列产品的开发与应用奠定基础。

1 逆变电路拓扑选型

感应电动机的运行要求定子绕组能够产生旋转磁场,而SPIM的定子通常由相互直交的主绕组 L_m 和副绕组 L_a 构成,并通过在副绕组中串联辅助电容 C (图1a),使主/副绕组电流的相位差为 90° ,从而形成旋转磁场。因此,有以下几种适用于SPIM的逆变电路拓扑(本文不考虑需要大容量电容器、直流母线电压利用率低的电容中点单H型逆变电路)。

1)单H桥拓扑:不改变SPIM的结构与接线形

收稿日期: 2015-12-31

通信作者: 徐 政(1960—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力电子技术、光伏发电技术研究和产品开发等方面的研究。
xuz@sz.tsinghua.edu.cn

式,由逆变器提供单相 PWM 电压,实现变频调速控制(图 1b),具有电路结构与控制方法简单的优点。但是,由于副绕组中辅助电容的存在,使得主/副绕组电路阻抗的频率特性差异大,无法使两者的电流始终保持合理的相位差,从而影响调频运行特性。

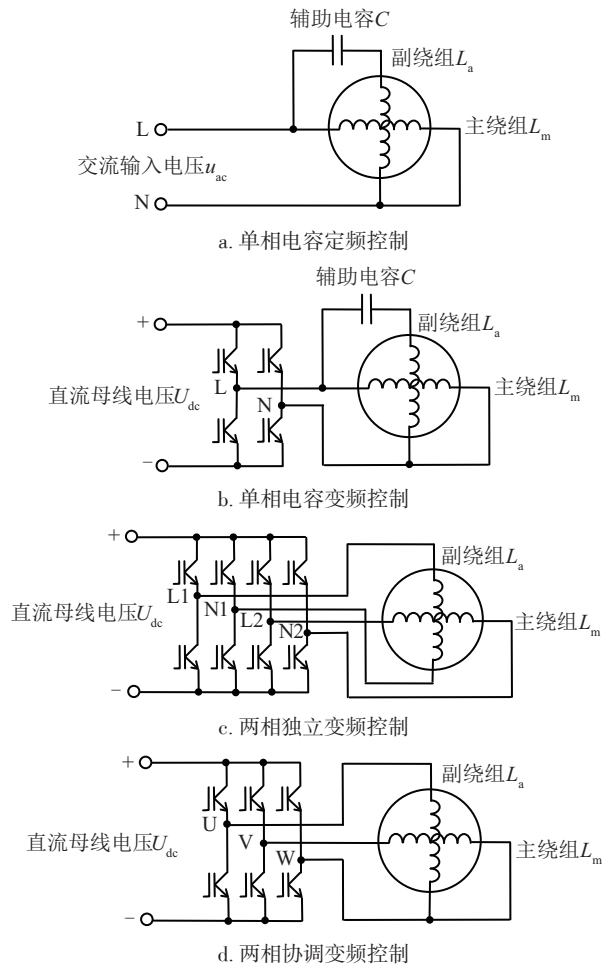


图1 单相感应电动机的结构与控制
Fig. 1 Structure and control of SPIM

为确认辅助电容的影响,设定 V - f 曲线(V 和 f 分别为变频器的输出电压与频率),对一台标称功率 750 W、扬程 56 m、流量 2 m³/h 的单相深井潜水泵进行了测试。首先,改变辅助电容的电容值(19~65 μF),检测主/副绕组电流的相位差变化。结果表明,当输出频率固定为 40 Hz 时,随着电容的增大,主/副绕组电流相位差由 103°逐渐减小至 49°,电容为 25 μF 时的相位差最接近 90°,且水泵功耗最小。综合其他频率下的实验结果,可知 25 μF 为被试水泵的最佳匹配电容值,与水泵生产厂家的推荐值接近,其运行特性如表 1 所示。

表1 辅助电容为 25 μF 时的实验结果

Table 1 Experimental results with 25 μF serial capacitor			
频率/Hz	主绕组电压/V	输入功率/W	电流相位差/(°)
50	208	1378	82
45	173	1025	84
40	137	753	86
35	102	552	92
30	78	384	96

将单位时间内流体势能的增量与水泵功耗之比定义为系统的扬水效率 η , 即:

$$\eta = \frac{\rho g Q h}{3600 P} \quad (1)$$

式中, ρ ——流体密度, kg/m³; g ——重力加速度, m/s²; Q ——流量, m³/h; h ——实际扬程, m; P ——水泵功耗, W。

分别采用单相和三相感应电动机驱动同一台水泵,在实际扬程为 26 m 的系统中进行对比实验,结果如表 2 所示。

表2 单相/三相感应电泵的运行特性对比

Table 2 Comparison of operating characteristics of a pump driven by single-phase and three-phase induction motors

频率/ Hz	扬水效率/%		功率因数	
	单相电泵	三相电泵	单相电泵	三相电泵
50	24.8	24.3	0.968	0.782
46	26.9	26.1	0.943	0.798
42	27.9	27.2	0.939	0.820
38	25.6	25.6	0.928	0.838
34	7.9	13.1	0.907	0.832

低速运行时三相电泵的效率略高,而高速运行时则相反。由于辅助电容的补偿作用,单相电泵的功率因数明显高于三相电泵。但实验结果同时表明,三相电泵在低频(<5 Hz)时均能启动和稳定运行,而单相电泵的最低启动频率为 35 Hz,启动后的最低运行频率为 25 Hz,将使光伏扬水系统的可运行时间变短,利用率降低。另外, PWM 电压会导致辅助电容中脉动电流的增加,影响其使用寿命。若使用附加电感,则输出电压减小。因此,使用辅助电容的方案不适于光伏扬水系统。

2) 双 H 桥拓扑:为保证单相电泵的调速运行范围、彻底消除辅助电容的影响,可拆除辅助电容,分别对主绕组和副绕组实施相应的控制。依据文献[4]的

研究结果,对于主/副绕组匝数比为 $1:a$ 的非对称单相电动机,最佳工作状态为 $I_m=a \cdot I_a$,对应的输入电压可近似为 $U_a=a \cdot U_m$,其中, I_m 和 I_a 分别为主、副绕组电流的有效值, U_m 和 U_a 分别为主、副绕组电压的有效值。但是,在实际应用中,由于难以获取准确的主/副绕组匝数比信息,且主/副绕组的匝数通常不会有太大的差异,所以最简单和通用的方法就是对主/副绕组施加大小相等、相位差为 90° 的交流电压。

定义直流母线电压利用率 A_U 为:

$$A_U = \sqrt{2}U/U_{dc} \quad (2)$$

式中, U ——逆变器输出电压有效值, V; U_{dc} ——直流母线电压, V。

双 H 桥逆变电路(图 1c)原理上能够实现对主绕组和副绕组完全独立的控制,只需采用简单的正弦调制法,理论上最大直流母线电压利用率 A_{Umax} 可达 1。但是,需要使用 8 个开关器件并对其进行控制,装置的成本高、通用性差。而且通用 SPIM 水泵产品通常已在内部将主/副绕组的一端联在一起,作为公共输入端,难以彻底分开。因此,在实际应用中不能保证双 H 桥方案能够顺利实施。

3) 三相桥拓扑:将三相逆变电路的输出端(U、V、W)分别与单相电泵的副绕组、主绕组和公共端相接,就能对 2 个绕组施加不同的电压(图 1d)。其最大的优点就是能够利用现有的通用变频器或逆变器产品,无需新的硬件开发,通用性好,可作为 SPIM 控制的首选方案。但是,由于公共端的存在,无法对主/副绕组实现完全独立的控制,需要对输出波形调制方法作相应的调整与优化,提高直流母线电压利用率。

2 波形调制方法

2.1 正弦超调法

以副绕组的电压相位为基准,主绕组电压相位滞后 90° ,采用式(3)所示的常规三相正弦调制法,能够输出两相正弦 PWM 电压。

$$\begin{cases} D_U = 0.5 \times [1 + m \sin(\theta + \pi/4)] \\ D_V = 0.5 \times [1 + m \sin(\theta + 5\pi/4)] \\ D_W = 0.5 \times [1 + m \sin(\theta + 3\pi/4)] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_a = U_U - U_W = \frac{\sqrt{2}}{2} m U_{dc} \sin \theta \\ U_m = U_V - U_W = \frac{\sqrt{2}}{2} m U_{dc} \sin(\theta - \pi/2) \end{cases} \quad (4)$$

式中, D_U 、 D_V 、 D_W ——各相调制波, $0 \sim 1$; U_m ——主绕组电压, V; U_a ——副绕组电压, V; m ——调制率, $0 \sim 1$; θ ——副绕组电压相位角, rad。

调制波与等效输出电压波形如图 2 所示,波形良好,但 $A_{Umax}(m=1)$ 仅为 $1/\sqrt{2}$,无法满足高速运行时对输出电压的要求。

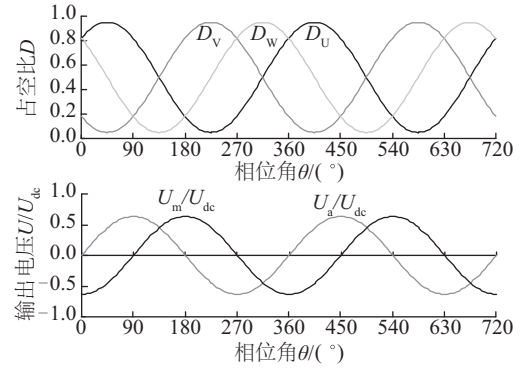


图2 正弦调制波形($m=0.9$)

Fig. 2 Waveforms of sine modulation

为提高直流母线电压利用率,采用正弦超调法,将式(3)的调制波改为:

$$\begin{cases} D_U = 0.5 \times [1 + \sqrt{2} m \sin(\theta + \pi/4)] \\ D_V = 0.5 \times [1 + \sqrt{2} m \sin(\theta + 5\pi/4)] \\ D_W = 0.5 \times [1 + \sqrt{2} m \sin(\theta + 3\pi/4)] \end{cases} \quad (5)$$

当 $m \leq 1/\sqrt{2}$ 时,等效输出电压为正弦波。

$$\begin{cases} U_a = m U_{dc} \sin \theta \\ U_m = m U_{dc} \sin(\theta - \pi/2) \end{cases} \quad (6)$$

当 $m > 1/\sqrt{2}$ 时,由于占空比 D 的可调范围为 $0 \sim 1$, D_U 、 D_V 和 D_W 将被限值。因此,虽然等效输出电压的峰值能够满足要求,但波形出现畸变,有效值减小,如图 3 所示。

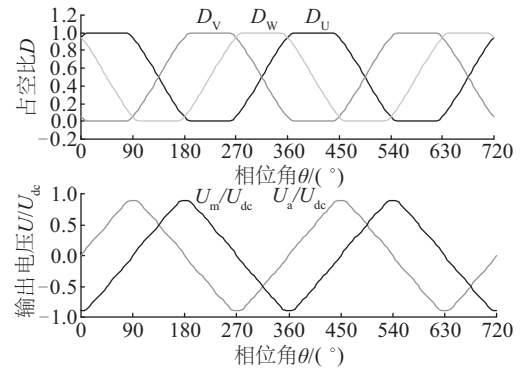


图3 正弦超调波形($m=0.9$)

Fig. 3 Waveforms of sine overshoot modulation

当 $m=1$ 时,等效输出电压波形接近三角波,总谐波畸变率为 13.4%,与常规正弦调制法相比, $A_{U_{\max}}$ 由 0.707 提高至 0.826。但高速运行时,仍将面临电压偏低、谐波电流增加等问题。

2.2 母线箝位法

为进一步提高直流母线电压利用率,并减小开关损耗,本文首先提出母线箝位调制法,通过锁定某一相的开关状态,优先保证正负峰值电压的输出。将输出电压的 1 个周期等分为 4 个区间,调制波的计算公式如下:

$$\begin{cases} D_U = m(\sin \theta + \cos \theta) \\ D_V = 0 \\ D_W = m \cos \theta \end{cases} \quad -\frac{\pi}{4} \leq \theta < \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

$$\begin{cases} D_U = 1 \\ D_V = 1 - m(\sin \theta + \cos \theta) \\ D_W = 1 - m \sin \theta \end{cases} \quad \frac{\pi}{4} \leq \theta < \frac{3\pi}{4} \quad (8)$$

$$\begin{cases} D_U = 1 + m(\sin \theta + \cos \theta) \\ D_V = 1 \\ D_W = 1 + m \cos \theta \end{cases} \quad \frac{3\pi}{4} \leq \theta < \frac{5\pi}{4} \quad (9)$$

$$\begin{cases} D_U = 0 \\ D_V = -m(\sin \theta + \cos \theta) \\ D_W = -m \sin \theta \end{cases} \quad \frac{5\pi}{4} \leq \theta < \frac{7\pi}{4} \quad (10)$$

图 4 为不同调制率下的调制波与等效输出电压波形,当 $m \leq 1/\sqrt{2}$ 时,每段锁相长度为 90° ,能够输出理想的正弦波;当 $m > 1/\sqrt{2}$ 时,每段锁相长度逐渐增加,波形出现局部畸变,并有跳跃点;当 $m=1$ 时,每段锁相长度增至 135° ,峰值电压符合要求, $A_{U_{\max}}$ 达到 0.957,但电压波形畸变明显,总谐波畸变率为 15.6%。

2.3 改良型母线箝位法

上述母线箝位法为了确保输出电压波峰附近的大小与波形,导致另一相的电压波形出现局部凹陷。对此,本文在母线箝位法的基础上,提出一种改良的方法。先由式(7)~式(10)计算调制占空比,而在波形凹陷区间内采用折衷的策略,重新计算 D_W ,适当压低波峰附近波形、填补另一相的凹陷,并保证电压波形没有跳跃点。

当 $m > 1/\sqrt{2}$ 时,由 $m(\sin \theta_0 + \cos \theta_0) = 1$,其中, θ_0 为波形开始发生凹陷的相位角,可得:

$$\theta_0 = \arcsin \frac{1}{\sqrt{2}m} - \frac{\pi}{4} \quad (11)$$

D_W 需要重新计算的区间及其计算公式如下:

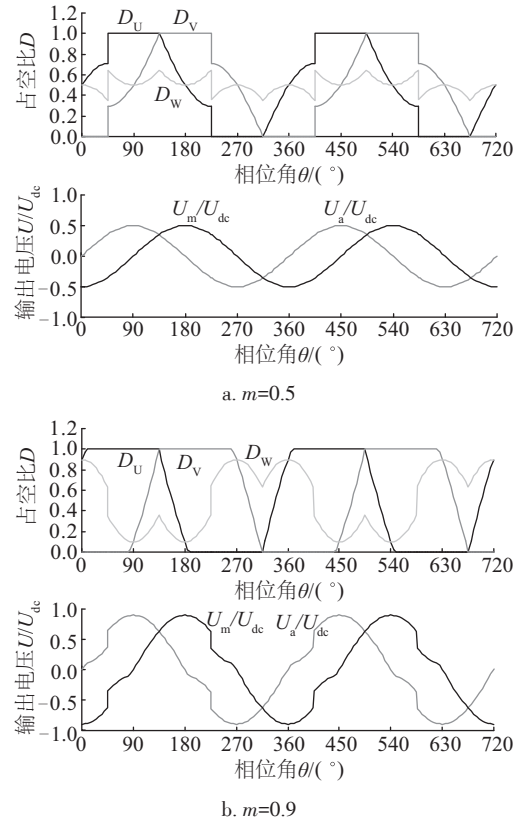


图 4 母线箝位调制波形

Fig. 4 Waveforms of bus-cramp modulation

区间 1: $\theta_0 < \theta < \pi/2 - \theta_0$

$$D_W = m \cos \theta_0 - \frac{m \cos \theta_0 - 0.5}{\pi/4 - \theta_0} (\theta - \theta_0) \quad (12)$$

区间 2: $\pi + \theta_0 < \theta < 3\pi/2 - \theta_0$

$$D_W = 1 - m \cos \theta_0 + \frac{m \cos \theta_0 - 0.5}{\pi/4 - \theta_0} (\theta - \pi - \theta_0) \quad (13)$$

图 5 为改良型母线箝位法的调制波与输出电压波形,主绕组电压在正半周的下降过程和负半周的上升过程中的部分区间、副绕组电压在正半周的

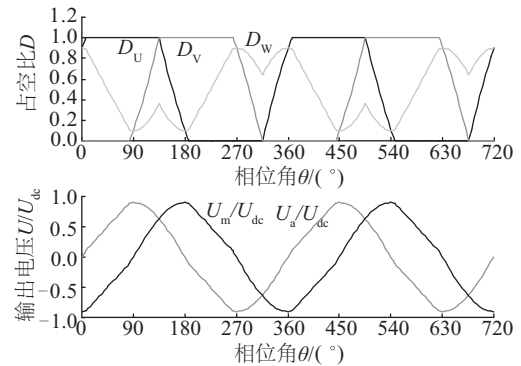


图 5 改良型母线箝位调制波形 ($m=0.9$)

Fig. 5 Waveforms of improved bus-cramp modulation

上升过程和负半周的下降过程中的部分区间线性变化,其余区间保持良好的正弦波形。当 $m=1$ 时,每半周电压波形由三角波和正弦波组成。与母线箝位法相比较, $A_{U_{\max}}$ 降至 0.913,但对应的谐波畸变率降为 8.7%。

3 实验结果

使用自主开发的光伏扬水逆变器和前述的单相深井潜水泵,分别在电机特性测试平台、水泵特性测试平台及光伏扬水实验系统上,进行实验验证。

3.1 电机与调制特性

首先,使用 LCR 电桥检测主绕组与副绕组的参数,结果表明副绕组的各项参数值均大于主绕组,但 R_m/L_m 与 R_a/L_a 接近 (R_m 、 R_a 分别为主绕组和副绕组的电阻),为非对称两相电动机,若根据电感量与匝数平方成正比的规则作推测,主/副绕组匝数比约为 1:1.15,故施加大小相同、相位差 90° 的电压时,主绕组电流大于副绕组电流,由主绕组提供大部分有功功率,而主/副绕组电流的相位差基本可保持为 90° 。

使用 330 V 直流稳压电源和图 1d 的接线方式,分别以正弦超调法、母线箝位法及改良型母线箝位法对水泵实施变频调速控制,输出频率范围为 5~50 Hz,系统均能稳定运行,图 6 为部分电流波形,主/副绕组电流的大小差别明显。

当逆变器输出频率低于 40 Hz 时,主/副绕组的电流波形良好,相位差稳定在约 90° ;当高于 40 Hz 时,电压波形畸变导致电流波形畸变,主/副绕组电

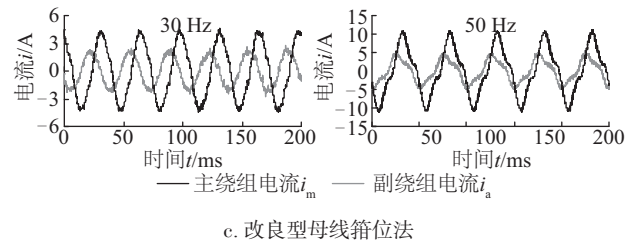
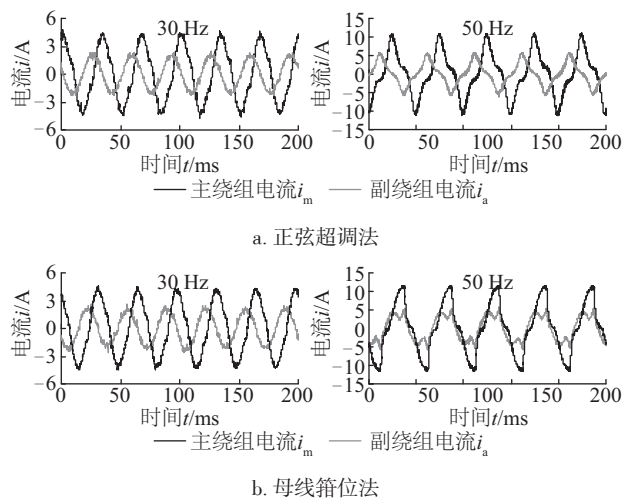


图 6 不同调制方法的电流波形

Fig. 6 Current waveforms under different modulation methods

流相位差也随之变化,其中母线箝位法的电流谐波和电机振动最大。受最大直流母线电压利用率及 PWM 最窄脉宽限制的影响,50 Hz 时正弦超调法的输出电压仅为 171 V,电机滑差较大,水泵实际转速低,输入功率为 1287 W。母线箝位法可将输出电压提升至 202 V,水泵输入功率为 1495 W。而改良型母线箝位法的输出电压为 201 V,水泵输入功率为 1405 W,电流波形得到明显改善,水泵运行状态更平稳。

3.2 水泵运行特性

在水泵特性测试平台上,测试不同调制方法下水泵的运行特性,包括不同频率下的流量、扬程、功率与效率。实验结果表明,调制方法对水泵运行状态的影响,低速运行时基本相同,高速运行时有明显差异。图 7 为采用改良型母线箝位法时不同频率下水泵的实测扬程-流量曲线和扬程-功率曲线,呈现了离心泵的典型特性。

图 8 为采用不同调制方法全速运行时水泵的功率和效率曲线,受最大直流母线电压利用率的影响,水泵功率有较大差异,由大到小依次为母线箝位法、改良型母线箝位法和正弦超调法。水泵运行效率方面,由于电流谐波大、主/副绕组电流相位差不理想,母线箝位法略低,而其余 2 种方法接近。因此,综合考虑功率、谐波和效率等特性,在产品开发中选择改良型母线箝位法。

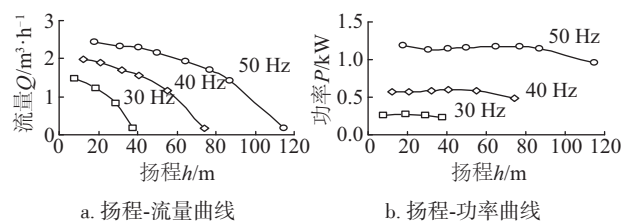


图 7 改良型母线箝位调制下的水泵运行特性

Fig. 7 Operating characteristics of the pump under the improved bus-clamp modulation

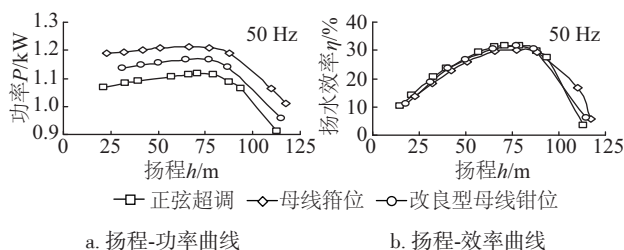


图8 不同调制方法下的输出功率和扬水效率

Fig. 8 Power outputs and efficiencies under different modulation methods

3.3 系统运行特性

MPPT 控制是光伏扬水逆变器必不可缺的功能,本文采用与三相逆变器相同的混成 MPPT 控制法^[8]。由于单相电泵的功率具有倍频脉动的特性,可能影响 MPPT 精度,故使用能够模拟光伏阵列输出特性的可控直流电源,确认 MPPT 控制特性。实验结果如表 3 所示。采用改良型母线箝位法,水泵全速(50 Hz)运行的功耗 P_{Pmax} 约为 1300 W。当光伏模拟电源设定的最大功率 P_{max} 小于 P_{Pmax} 时,MPPT 精度保持在 99%以上,表明逆变器中的平波电容发挥了良好的解耦作用。当 P_{max} 大于 P_{Pmax} 时,水泵不能超速运行,偏离最大功率点。

表3 稳态运行特性实验结果

Table 3 Experimental results of steady performance

最大功率设定 P_{max}/W	输出频率 f/Hz	输出功率 P/W	MPPT 精度 $\eta_{\text{MPPT}}/\%$
500	36.0	497	99.5
1000	45.4	999	99.9
1300	49.9	1291	99.3
1500	50.0	1304	86.9

在光伏扬水实验系统上进行长期运行测试,光伏阵列采用非晶硅薄膜组件,峰值功率 2.16 kW。图 9 为阴间多云天气条件下的全天运行状态变化曲线,由于光伏阵列入射太阳辐照度较低,系统始终处于降频 MPPT 工作状态,逆变器的输出频率和电压随光照强弱迅速变化,除 15:00~16:00 时段受局部阴影的影响外,光伏阵列输出功率曲线与入射光照强度曲线形状一致,表明系统控制动态性能良好。

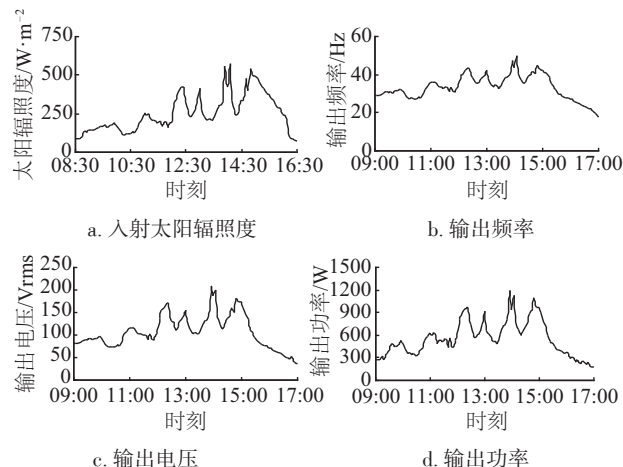


图9 光伏扬水系统日运行特性

Fig. 9 Daily performance of the solar pumping system

4 结 论

1) 对于单相电泵,可采用三相逆变电路向主/副绕组施加大小相等、相位差为 90° 的 PWM 电压,实现光伏扬水系统宽调速范围的高效与稳定运行。

2) 改良型母线箝位调制法能够提高直流母线电压利用率,并抑制电压与电流谐波,从而改善了水泵的运行特性。

3) 逆变器中的平波电容抑制了单相电泵功率倍频脉动的影响,保证了光伏扬水系统的 MPPT 精度和系统稳定运行。

[参考文献]

- [1] 陈光东, 郝晓田. 单相电容电机变频调速器的逆变器结构[J]. 电气传动, 1997, (3): 15—17.
- [1] Chen Guangnian, Xi Xiaotian. The inverter form of varying frequency and speed regulation for single-phase capacitance motor[J]. Electric Drive, 1997, (3): 17—17.
- [2] Jang Do-Hyun, Yoon Duck-Yong. Space-vector PWM technique for two-phase inverter-fed two-phase induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 542—549
- [3] Jang Do-Hyun. Problems incurred in a vector-controlled single-phase induction motor, and a proposal for a vector-controlled two-phase induction motor as a replacement[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 526—536.
- [4] Holmes D G, Kotsopoulos A. Variable speed control of

- single and two phase induction motors using a three phase voltage source inverter[A]. Conference Record of IEEE- IAS Annual Meeting [C], Toronto, Canada, 1993, 613—620.
- [5] 陆宏亮, 戴国骏, 钱照明. 一种新型两相感应电动机变频调速SPWM控制技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 44—50.
- [5] Lu Hongliang, Dai Guojun, Qian Zhaoming. A novel SPWM control strategy for frequency control of two phase induction motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 44—50.
- [6] Correa M, Jacobina C B, Lima A M N, et al. A three-leg voltage source inverter for two-phase AC motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(4): 517—523.
- [7] Bouhoune K, Yazid K, Boucherit M S. Fuzzy logic based control of the single phase induction motor without start-capacitor[A]. 2013 Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG) [C], Istanbul, Turkey, 2013, 747—752.
- [8] 徐 政, 何少强, 李友春. 独立太阳能扬水系统的最大功率点跟踪方法[J]. 太阳能学报, 2008, 29(2): 193—197
- [8] Xu Zheng, He Shaoqiang, Li Youchun. A maximum power point tracking method for stand-alone solar pumping systems[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008, 29(2): 193—197.

DEVELOPMENT OF PHOTOVOLTAIC PUMPING SYSTEM BASED ON SINGLE-PHASE INDUCTION PUMP

Xu Zheng¹, Li Xu¹, Chen Ruijian²

(1. National Key Laboratory of Power System in Shenzhen, Graduate School of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Solartech Renewable Energy Co., Ltd., Shenzhen 518055, China)

Abstract: A photovoltaic pumping system based on a pump driven by a single-phase induction motor was developed. Two PWM voltages with phase difference of 90° were fed to the main and auxiliary windings of single phase induction motor by a normal three-phase inverter to realize the wide range of pump frequency control. A novel bus-cramp modulation method was proposed to raise utilization rate of DC-bus voltage, reduce voltage and current harmonics and improve the operating efficiency of photovoltaic pumping systems. The experimental results validate the effectiveness of the control scheme and the stability of system operation.

Keywords: photovoltaic pumping system; single-phase induction motor; pulse width modulation; utilization of DC bus voltage; bus-cramp