

变频钻机逆变器共用直流回路时的电容量研究

王有云¹,朱奇先¹,刘小宝¹,马志鑫²,田斌³

(1.大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室,甘肃 天水 741020;

2.中国石油技术开发公司,北京 100028;

3.西部钻探工程有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:拖动逆变器共用直流回路绝大多数为深井变频电动钻机的标准配法,据此分析了其中直流电容在空载、电动、回馈时的工作过程以及计算最小电容量需要的相关要素,提出了在1个充放电周期中最长放电时间与调制频率的关系,给出了直流回路最小电容量计算式。以标配7 000 m变频钻机为例,计算了其电容量并以相应功率的西门子装置进行了验证。对设计安装空间有特殊要求的海上钻井平台系统和降低装置成本有实际的参考价值。

关键词:7 000 m变频钻机标配;共用直流回路;电容工作过程;最小电容量计算

中图分类号:TM64;TM72 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.20171214

Research on Capacitance When Inverters of Variable Frequency

Drilling-rig Sharing DC Circuit

WANG Youyun¹, ZHU Qixian¹, LIU Xiaobao¹, MA Zhixin², TIAN Bin³

(1. State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology, Tianshui 741020,

Gansu, China; 2. China Petroleum Technology & Development Corporation, Beijing 100028, China;

3. Xibu Drilling Engineering Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Dragging inverters sharing DC circuit are standard configuration methods for the vast majority of deep-well variable frequency electric drive drilling-rig. According to methods, working processes of DC capacitor in no-load, electric driving and feedback states and relevant factors needed by calculating minimum capacitance were analyzed, the relationship between longest discharge time and modulation frequency in a charge and discharge cycle was put forward, and calculation formula of minimum capacitance in DC circuit was given. In the standard configuration of 7000 m variable frequency drilling-rig as an example, the capacitance was calculated and verified by SIEMENS device with corresponding power. This research has practical reference value to offshore drilling platform system with special needs of design and installation space and to reduce the cost of equipment.

Key words: standard configuration of 7 000 m variable frequency drilling-rig; sharing DC circuit; working process of capacitor; calculating minimum capacitance

变频钻机专指石油天然气勘探行业中的钻井装备,即绞车、转盘/顶驱、钻井泵等主要钻井机械由电气变频变速装置来拖动。由三相AC 600 V通过二极管变流桥获得直流电源,主要钻井机械的拖动逆变器共用直流回路,绝大多数为5 000 m及其以上变频钻机中电气变速部分的标

准配法,本文研究在此标配下直流回路电容量的配置。

1 单线简图

一种标准配置的7 000 m变频钻机电气拖动部分的电路单线简图如图1所示。

作者简介:王有云(1968-),男,本科,正高级工程师,Email:wyy@vip.163.com

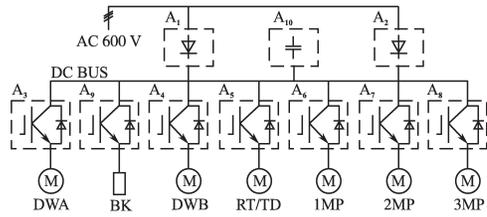


图1 ZJ70DB拖动部分电气单线图

Fig.1 Electric single line diagram for dragging part of ZJ70DB drilling-rig

图1中, A_1, A_2 为二极管三相整流单元, 用于提供直流 810 V 电源; DC BUS 为直流回路的母线; $A_3 \sim A_8$ 为逆变(器)单元, 用于绞车、转盘/顶驱、钻井泵机械的电气变速; A_9, BK 为能耗制动单元, 用于防止直流母线电压超限; A_{10} 为直流回路电容, 用于维持输入直流电压平稳, 防止寄生电感在电流突变时感应高电压; DWA, DWB, RT/TD, 1MP ~ 3MP 为相应钻井机械的变频拖动电机。

2 基础数据

包括交流电源在内的计算电容用各变频单元电路如图2所示, 各部分电气数据如表1、表2所示。

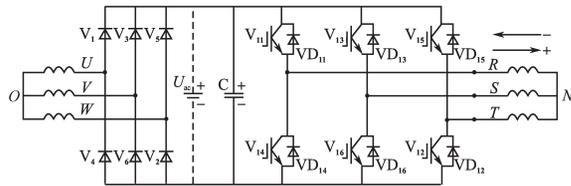


图2 变频单元电路

Fig.2 Circuit of variable frequency unit

表1 计算电容用相关部分数据

Tab.1 Related data for calculating capacitance

代号	交流电源	逆变器
	$O-U, V, W$	$VD_{11} \sim VD_{16}$
基本数据	3AC 600 V, 50 Hz, 容量 1 750 kV·A ~ 4×1 750 kV·A	开关频率 $f_c=1.25$ kHz, 最大调制比约等于 1, 效率 0.98

表2 电机数据及其工作状态

Tab.2 Motor data and working condition

电动机: R, S, T-N	DWA, DWB	RT/TD	1MP, 2MP, 3MP
极对数	3	3	3
额定功率/kW	800	800	1 200
额定电压/V	600	600	600
额定频率/Hz	33.5	50	50
工作频率范围/Hz	0 ~ 80	0 ~ 50	0 ~ 50
额定功率因数 $\cos\varphi$	0.87	0.87	0.87
额定效率 η_r	0.92	0.92	0.92
过载倍数 λ	1.3	1.0	1.0
同时工作数量	1 ~ 2 (自身单机、或双机)	1 ~ 4 (同时工作)	1 ~ 4 (与 RT 同时工作)
持续回馈制动	有	无	无

3 电容量计算

3.1 工作过程

在以上电机参数的变频钻机应用中, 电容的主要工作状态有: 逆变器使能后首先预充电, 充到设定电压时整流回路 A_1 或 A_2 或 A_1, A_2 投入, 最大空载电压 $U_{dc} = \sqrt{2}U_{in}$ (U_{in} 为交流输入电压的有效值); 在任一给定频率下空载运行时, 电容提供电机的励磁电流(根据磁通设定值变化, 在有速度传感器时约为额定的 20% ~ 30% 左右, 滞后角 $\varphi \approx 90^\circ$); 正常工作时, 电机轴上负载(对应电流)从 0 逐渐增加(电动状态)到最大的额定值时, 功率因数将从 0(忽略损耗)增加到额定值 0.87 左右, 电流滞后角将从 $\varphi \approx 90^\circ$ 减小到 $\varphi \approx 30^\circ$ 左右, 如图 3、图 4 所示。

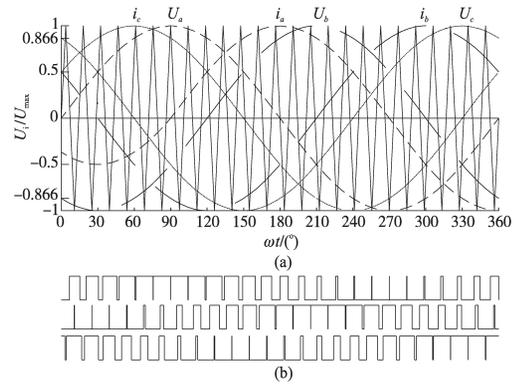


图3 空载、额定频率、 $f_c=1.25$ kHz 及 $\varphi=90^\circ$ 时的 PWM 调制图

Fig.3 PWM modulation figure in no-load, rated frequency, $f_c=1.25$ kHz and $\varphi=90^\circ$

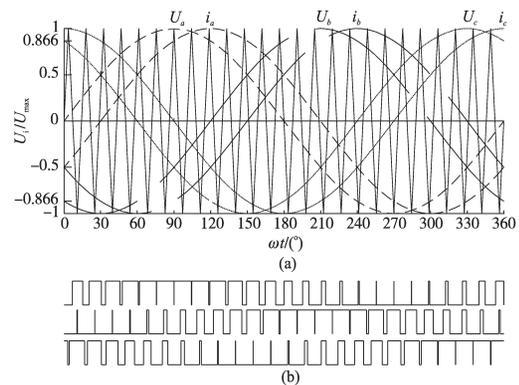


图4 额定负载、频率、 $f_c=1.25$ kHz 及 $\varphi=30^\circ$ 时的 PWM 调制图

Fig.4 PWM modulation figure in rated load, frequency, $f_c=1.25$ kHz and $\varphi=30^\circ$

与此对应, 电容器、直流母线、电机绕组之间通过功率开关管在 PWM 的各时段随着绕组内电流的流向(流进为+, 流出为-)形成完全的或部分的交替变换的充电、放电回路, 充、放电时间将

从开始时的接近相等(忽略开通与关断过程、不计整流电源给电容器充电)过渡到放电时间大于充电时间,最终变化到只有放电的时间;当电机轴上转速超过给定的同步转速并且负载逐渐增加到额定时,电流滞后角将从 $\varphi \approx 90^\circ$ 增加到 $\varphi \approx 150^\circ$ 左右。与此对应,电容器、直流母线、电机绕组之间通过功率开关管在PWM的各时序段也将形成交替的充电、放电回路,充、放电时间将从开始时的接近相等(忽略开通与关断过程)变化到充电(无整流电源给电容器充电过程)时间远大于放电时间。

由上述叙述可知,电机在电动额定状态时,电容器在单独供电时间段的能力将决定电容量的大小。

3.2 电容电压

电容(直流)电压与电容量及逆变器工作状态密切相关,当电容量较小或者没有时的直流电压波形(50 Hz)如图5所示。

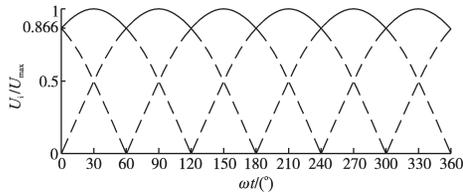


图5 没有电容时直流电压在1个周期波形

Fig.5 Cycle waveforms of DC voltage without capacitance

当逆变器在额定的负载和输出频率以内从0开始连续变化时,由于电机绕组对电容充放电的影响,直流电压的波形比较复杂;当电容量不是很大的电动状态且负载在额定附近变化时的近似波形如图6中的曲线1~3所示;当电机在回馈状态时,直流电压将超过 U_{dc} 直到制动单元开始工作为止,波形如图6中曲线4所示。

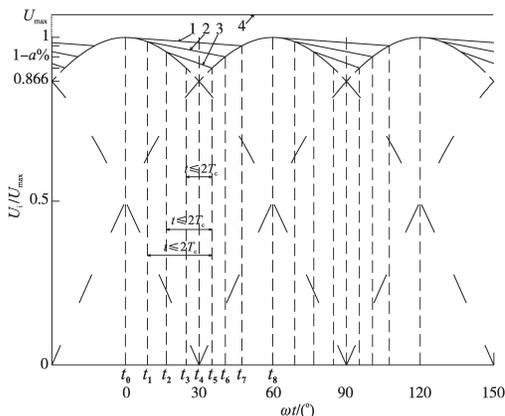


图6 电容量较小且接近额定负载时在180°内电压波形

Fig.6 Voltage waveforms within 180° when capacitance is small and close to the rated load

3.3 容量算法

以电源输入频率50 Hz、电机在电动状态、额定负载时电容单独供电过程(图6中从 t_1 或 t_2, t_3 到 t_7 或 t_6, t_5)计算最小电容量。从 t_5 (或 t_6 或 t_7)开始,电源给负载供电的同时也给电容充电,电容电压随电源电压的升高而升高,电容器储能,到了 t_8 (在前一个波形相当于 t_6)时刻,电容电压达到最大值 $U_{dc} = \sqrt{2}U_{in}$;过此以后,如果电容量较小,电容处于放电状态,电压将与电源电压变化一致,此时负载所需功率由电源和电容同时供给,在 t_1 或 t_2, t_3 时刻,电源电压低于电容电压,负载功率完全由电容器提供,直到进入下一个充电周期的 t_5 或 t_6, t_7 为止。

根据图3、图4所示的调制频率与图6所示的充、放电工作过程可知,在逆变器 $0 \sim f_c$ (电机额定频率)的输出范围内,当调制比为1、输出为额定频率(电压)时,电容将有连续最重负载、最长的放电时间 $t \leq 2T_c$ ($T_c = 1/f_c, f_c$ 为开关频率)。

以 t_8 时刻为时间(角度)零点建立坐标系,输出直流电压的表示式为

$$U_{dc} = \max[\sqrt{2}U_{in} \cos(\omega t), \sqrt{2}U_{in} \cos(\omega t - \pi/3)] \quad (1)$$

式中: ω 为电源频率。

以 $\sqrt{2}U_{in}$ 为基准,如果允许其最大波动率为 a ,则最低直流电压为

$$U_{min} = \sqrt{2}U_{in} - \sqrt{2}U_{in} \cdot a = \sqrt{2}(1 - a) \cdot U_{in} \quad (2)$$

此时对应的时刻 $t_5(t_6, t_7)$ 的角度为

$$\alpha_0 = \omega \cdot t_5 = \arccos(1 - a) \quad (3)$$

从 t_4 到 t_5 的时间的角度为

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \pi/6 - \alpha_0(\omega \cdot t_5) \\ &= \pi/6 - \arccos(1 - a) \end{aligned} \quad (4)$$

因此电容放电的最短时间的角度 α_2 为

$$\alpha_2 \geq 2\alpha_1 = \pi/3 - 2 \arccos(1 - a) \quad (5)$$

根据上文叙述,电容的最长连续放电时间的角度应大于 α_2 ,即

$$t(\alpha_3) > \alpha_2 \quad (6)$$

当放电时间为 $t \leq 2T_c$ ($T_c = 1/f_c$)时,直流电压在输入电源上对应时间的角度为

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= \pi/3 - \alpha_0 - 18^\circ t \\ &= 60^\circ - \alpha_0 - 18^\circ \times 1.6 \\ &= 31.2^\circ - \alpha_0 \end{aligned} \quad (7)$$

50 Hz时,1 ms对应的角度为 18° , $18^\circ \times t$ 为 t ms对应的角度,此时直流电压为

$$\begin{aligned} U_c &= \sqrt{2}U_{in} \cos \alpha_4 \\ &= \sqrt{2}U_{in} \cos(31.2^\circ - \alpha_0) \end{aligned} \quad (8)$$

设电机输出功率为 P 且恒定不变,从 t_1 (或 t_2 , t_3)开始到 t_7 (或 t_6, t_5)为止,由于负载所需能量完全由电容提供,因此有

$$\frac{1}{2}C(U_c^2 - U_{\min}^2)\eta_b\eta_d = P \cdot 2T_c \quad (9)$$

$$C \cdot U_m^2 [\cos^2(31.2^\circ - \alpha_0) - (1-a)^2] \eta_b \cdot \eta_d = 1.6P \quad (10)$$

式中: η_b, η_d 分别为变频器和电机的效率。

因此可得最小电容量为

$$C = \frac{1.6P}{U_m^2 [\cos^2(31.2^\circ - \alpha_0) - (1-a)^2] \eta_b \cdot \eta_d} \quad (11)$$

当 $U_m = 600 \text{ V}$, $\eta_b = 0.98$, $\eta_d = 0.92$ 时,电容量 C (μF)的计算式为

$$C = \frac{4.93 \cdot P}{\cos^2(31.2^\circ - \alpha_0) - (1-a)^2} \quad (12)$$

3.4 计算结果

按照式(12),根据基础数据,在不同的最大允许 a 、绞车、转盘、泥浆泵额定负载时,逆变器单独工作时需要的直流回路电容计算数据如表3所示。

表3 3种负载单独工作时在不同 a 下的电容量

最大波动数	$a=5\%$	$a=8\%$	$a=10\%$
U_m/V	600	600	600
绞车 800 kW	84 085 μF	29 496 μF	21 776 μF
转盘 400 kW	42 043 μF	14 748 μF	10 888 μF
泥浆泵 1 200 kW	126 128 μF	44 244 μF	32 664 μF

钻机拖动系统按图1配置,交流输入电压为600 V, a 在8%~10%、不同的操作工艺、实际最大负载时,按式(12)计算的需用最小电容总量见表4。

表4 3种工况额定负载时在不同 a 下的最小电容总量

工艺工况	钻进	起下钻	倒划眼
工作机械	转盘+泥浆泵	绞车	转盘+绞车+泥浆泵
最大需用功率/kW	400+3×1 200	2×800	400×0.2+2×800+3×1 200×0.6
$a=8\%$ 时电容量	147 480 μF	58 992 μF	141 605 μF
$a=10\%$ 时电容量	108 880 μF	43 552 μF	104 500 μF

3.5 影响因素

表3、表4需要的电容量为最小理论计算值,没有考虑纹波电流、运行温度、开关频率等因素

的影响。

对于钻机的应用,由于输出功率在800 kW以上的逆变器调制频率一般不超过2.5 kHz,因此实际配置时可不考虑运行频率,只需考虑吸收纹波电流的满足和运行温度对容量的影响。

4 结论

通过以上各节的叙述及计算,对用三相变流桥为直流电源供电的变频电动钻机,可以得到以下结论:

1) 直流回路电容的工作状态随着逆变器输出频率的变化在空载、负载、回馈状态的不同而不同,电动、额定负载时单独供电能力决定最小需要的电容量;

2) 双极调制模式时,单独放电的最长时间为调制周期的2倍;

3) 以最长放电时间的结束点对应电动额定负载时直流电压允许波动的最低值点状态计算电容量;以文中介绍的算法对比验证西门子S120系列1 000 kW, 1 200 kW整流+逆变器直流回路电容量的配置如表5所示,结果表明计算值与实际值基本符合,说明算法有参考价值;

表5 $a=8\%, f_c=1.25 \text{ kHz}$ 时计算容量与实际容量对比

整流+逆变订货号	6SL3730-1TH41-4AA0+6SL2720-1TG41-0AA0 ^[10]	6SL3730-1TH41-4AA0+6SL3720-1TG41-3AA0 ^[10]		
输入/输出电压/V	690	690	690	690
额定功率/kW	整流: 1 100	逆变: 1 000	整流: 1 100	逆变: 1 200
实际配置电容量/ μF	整流: 15 470	逆变: 14 400	整流: 15 470	逆变: 19 200
整流+逆变电容量/ μF	29 870		34 670	
$a=8\%$ 时计算电容量/ μF	27 879		33 454	

4) 共用直流母线的电容量只要按照操作工艺需要的最大负载工况配置,没有必要按照所有逆变器单独工作时的电容量总和来配置,能够在一定程度上降低成本。只要满足能够吸收功率开关器件发出的纹波电流,基本维持直流电压平稳,电容器可以集中布置,这对于安装空间比较紧张、特别是海上钻井平台来说,具有很大的实用价值;

(下转第82页)

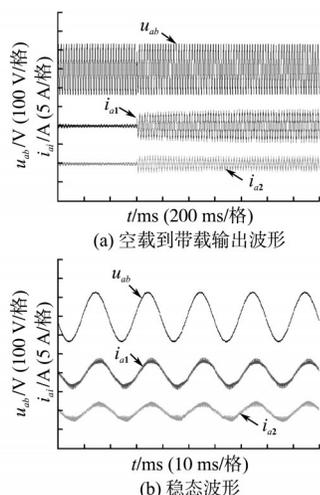


图7 不同容量VSG并联实验波形
Fig.7 Experimental waveforms of paralleled VSGs with different capacity

4 结论

本文研究了考虑不同容量并联VSG电流均分控制策略,实验结果验证了本文所推导的式(21)的正确性,并得到以下结论:

1)在功率均分方面,本文推导了适用于并联系统功率均分公式,可实现相同容量和不同容量并联VSG按照自身容量分担负载功率,有利于微网稳定运行;

2)在动态特性方面,突增突减负载的实验结果说明VSG具有良好动态特性,且并联过程无明显电流冲击,响应速度快;

3)在VSG参数设计方面,按照本文推导的关于功率均分的公式设计虚拟惯量 J ,阻尼系数 D ,调差系数 K_0 等VSG参数,可实现VSG并联

稳定运行。

参考文献

- [1] 王成山,李琰,彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(2):12-20.
- [2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
- [3] 彭慧敏,李峰,丁茂生,等. 交直流电力系统安全稳定及协调控制的评述[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(9):74-81.
- [4] 陈来军,王任,郑天文,等. 基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5724-5731.
- [5] Zhong Qing-Chang, George Weiss. Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [6] 徐少华,李建林,惠东. 多储能逆变器并联系统在微网孤岛条件下的稳定性分析及其控制策略[J]. 高电压技术,2015,48(10):3266-3273.
- [7] 何国锋. 多逆变器并联系统若干关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [8] 张建文,王鹏,王晗,等. 多逆变器并联的均流控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(18):61-68.
- [9] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
- [10] 杜燕. 微网逆变器的控制策略及组网特性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
- [11] Zhang Y, Liu H, Mantooth H A. Control Strategy of High Power Converters with Synchronous Generator Characteristics for PMSG-based Wind Power Application [C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2016.

收稿日期:2016-12-03

修改稿日期:2017-05-11

(上接第77页)

5)由于钻机变速对精度要求不高,在能够保证输出电压要求的能力以内,可以允许直流电压有较大的波动范围以减小电容量,从而降低成本和安装空间,这同样具有很大的实用价值。

参考文献

- [1] 张舟云,王晓东,徐国卿,等. 电力电子装置滤波电容容量的设计方法[J]. 电力电子技术,2005,39(1):70-72.
- [2] 王青松. 一种关于电压型变频器直流环节滤波电容的计算方法[J]. 电源技术应用,2006,9(6):41-43.
- [3] 周霞,王斯然,凌光,等. 三相桥式整流电路滤波电容的迭

代计算[J]. 电力电子技术,2011,45(2):63-65.

- [4] 陈德志,白保东,王鑫博,等. 逆变器母线电容及直流电抗器参数计算[J]. 电工技术学报,2013,28(增2):285-291.
- [5] 马小亮. 高性能变频调速及其典型控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [6] 张燕宾. 小功率异步电机[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [7] 朴德罗夫斯基. 电机学 第3册[M]. 清华大学电力机械教研组译. 上海:龙门联合书局出版,1953.

收稿日期:2016-12-07

修改稿日期:2017-04-06