

石油电动SCR/VFD钻机电网运行研究

以常规配置的7 000 m电动钻机为例, 钻探过程中实际工况的几个典型工作点, 详细计算了直流和变频钻机变速部分的绞车在不同转速时, 在额定负载、过负载以及泥浆泵在额定、常用泵压下的电网里所产生的基波以及各次谐波电流和功率因数的大小; 以辅助钻井设备在最大功率时, 计算了两种钻机在不同工况下总电网的有功功率、容量、无功功率、功率因数、谐波电压以及电压畸变率, 说明了谐波和功率因数对配套网电和常规钻机电网时的影响。

张振中¹ 王增顺² 徐 成³ 田 斌⁴ 朱奇先¹ / 1. 大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室 2. 中国石油渤海钻探第四钻井公司 3. 中国石油技术开发公司 4. 西部钻探工程有限公司

0 引言

石油电动钻机的电网主要由柴油发电机组(常规钻机)或10(6) kV/0.6(0.4) kV变压器(网电钻机)、母线汇流排及其控制系统等构成, 是电控系统重要单元之一。本文研究绞车、转盘/顶驱和泥浆泵以SCR(直流调速)和VFD(交流调速)拖动的钻机在运行时电网的功率因数、谐波等参数及其影响。

1 单线简图

一种由柴油发电机组或高压变压器供电的电控系统功率因数、谐波计算用单线简图如图1所示。

图1中GEN为柴油发电机组; D为发电机; G为发电机; 10(6) kV为工业电网; T₁为高压变压器(10或6 kV/0.6 kV); 600 V为电网的汇流排; U₁(直流钻机)、U₂(变频钻机)为绞车、转盘/顶驱和泥浆泵变速控制装置; M为主拖动电动机(直流或交流); T₂为主压变压器(600 V/400或460 V); 400(460) V为

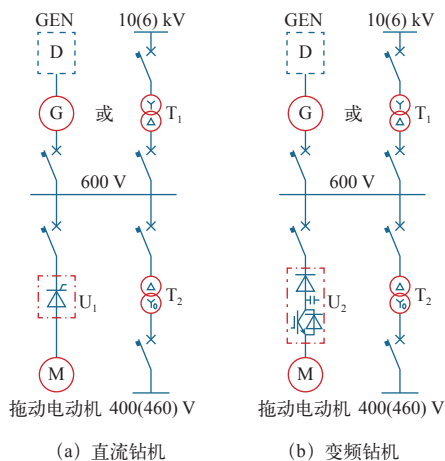


图1 电网计算单线简图

辅助钻井设备拖动电动机的汇流排。

2 基础数据

2.1 负载特性

由图1知, 电动钻机(4 000 m以上) 600 V电网的主要负载为变速控制装置和T₂变压器。T₂变压器的主要负载为拖动辅助钻井设备的交流异步电动机, 其功率随钻井工况的变化而变化, 最大有功600 kW(7 000 m钻机), 功率因数在0.8左右, 对电网只有50(60) Hz的基波电流需求, 因此属一般线性感性负载; 变速控制装置及连接的拖动电动机为电网的主要负载, 不但需要电网提供50(60) Hz的基波电流, 还需要提供谐波电流, 功率因数低且随钻井工况的变化而变化^[1], 因此属非线性感性负载。

2.2 相关数据

以标准配置的7 000 m电动钻机为例, 计算功率因数和谐波用相关数据如表1~表4所示。



张振中/高级工程师

关键词/Keywords

钻机电网 ·
谐波、功率因数计算 ·
应对措施 ·

表1 绞车、泥浆泵机械和电网相关数据

参数	直流钻机	变频钻机
额定功率 P_e /kW	1 470(2 000 hp)	1 470(2 000 hp)
绞车 拖动电动机	2×800 kW	$2 \times 1\,000$ kW
过载倍数	1.36额定	1.36额定
额定功率 P_e /kW	1 176(1 600 hp)	1 176(1 600 hp)
泥浆泵 额定冲数/(次/min)	120	120
拖动电动机	2×800 kW	$1 \times 12(4)00$ kW
皮带效率 η (%)	98	98
电网 额定电压 U_d /V	600	600

表2 拖动电动机相关数据

参数	800 kW直流	800 kW交流	1 200 kW交流
额定电压 U_d /V	DC 750	AC 600	AC 600
额定电流 I_d /A	DC 1 150	AC 953	AC 1 381
额定效率 η (%)	93	95	95
额定功率因数	—	0.85	0.88
过载倍数	1.5额定	1.6额定	1.6额定
回路电阻 R/Ω	0.02	—	—

表3 直流变速装置 U_1 及电抗器 L 的相关数据

参数	U_1	L
额定电压 U_d /V	773	2 000
额定电流 I_d /A	2 300	2 300
额定效率 η (%)	98	—
阻抗压降 Z_k (%)	—	4

表4 变频调速装置 U_2 中两类西门子逆变器相关数据

型号	6SL3720-1TG41	6SL3720-1TG41	ACS800-107
特性参数	-0AA3-Z	-3AA3-Z	-1740-7
额定输出功率 P_e /kW	1 000	1 200	1 400
额定输出电压 U_2 /V	3AC 0~690	3AC 0~690	3AC 0~690
输出频率/Hz	0~100/113	0~100/113	0~100/113
额定输出电流 I_2 /A	1 025	1 270	1 414
10 s启动输出电流/A	1 500	1 845	2 116
基波功率因数	>0.96	>0.96	>0.98
额定效率 η (%)	>98.5	>98.5	>98

2.3 计算依据

绞车、泥浆泵和转盘/顶驱在额定工况时拖动电动机需要的电流计算式，对直流钻机为

$$I_d = \frac{P_e}{U_{eM} \eta_{pd} \eta_{dj}} \quad (1)$$

对变频钻机为

$$I_d = \frac{P_e}{\sqrt{3} U_{eM} \cos \alpha \eta_{pd} \eta_{dj}} \quad (2)$$

直流钻机时，变流器的触发角计算式为

$$\alpha = \arccos \frac{U + I_d R}{1.35 U_{Ge}} \quad (3)$$

换相重叠角的计算式^[2]为

$$\gamma = \frac{\left[\arccos(\cos \alpha - Z_k \cdot \frac{I_d}{I_{ed}}) - \alpha \right] \pi}{180} \quad (4)$$

600 V电网基波电流有效值的计算式为

$$I_1 = \frac{\gamma/2}{\sin(\gamma/2)} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (5)$$

谐波电流的有效值计算式为

$$I_h = \frac{I_1}{h} \cdot \frac{\sin(h\gamma/2)}{h\gamma/2} \quad (6)$$

对变频钻机，不同负载率时，电网各谐波含量的计算表如表5所示， I_d 、 I_{ed} 为变流桥或变频器的工和额定电流（直流平均值或交流有效值）。

表5 不同负载率时 I_h/I_{ON} 含量表^[1]

负载率	$I_d/I_{ed} = 25\%$	$I_d/I_{ed} = 50\%$	$I_d/I_{ed} = 75\%$	$I_d/I_{ed} = 100\%$
波次				
基波	26	52	77	103
5	15	23	28	32
7	7.8	8.9	8.9	9.1
11	2.6	4.1	5.4	6.2
13	1.7	2.3	2.7	3.5
17	1.3	1.8	2.3	2.5
19	0.8	1.2	1.7	1.9
23	0.6	0.82	1.0	1.3
25	0.46	0.69	0.9	1.2

多台变流装置产生的同次谐波（不同相位角）叠加的计算式^[1]为

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + K_h \cdot I_{h1} \cdot I_{h2}} \quad (7)$$

式中， h 为谐波次数， $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$ ； K_h 为计算系数，对应各 h 的值时分别为1.28, 0.72, 0.18, 0.08, 0, 0, 0, 0； I_{h1} 为 h 次谐波电流有效值。

在电网电压畸变很小时，电网的有功功率 P 、视在功率 S 、功率因数 λ 及无功功率 Q 的计算式分

别为

$$P = \sqrt{3}UI_1 \cos \varphi_1 \quad (8)$$

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{3}U \sqrt{I_1^2 + \sum I_h^2} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \nu \cos \varphi_1 \quad (10)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (11)$$

其中整流装置的电流基波与电压的相位差

$$\varphi_1 = \alpha + 28.6\gamma \quad (12)$$

对于三相桥式可控整流系统,基波因数

$$\nu = \sqrt{\frac{3\pi}{3\pi - \gamma}} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\gamma/2}{\sin(\gamma/2)} \quad (13)$$

对于不可控整流系统的需按照表5折算。

3 谐波计算

3.1 直流钻机

3.1.1 单泵运行

当一台泥浆泵工作在40%、80%和100%额定泵压和冲数时,以上各参数计算数据如表6所示。

表6 泥浆泵在三种工况下各参数计算数据

工况	额定泵压时			额定泵冲时		
	40% 泵冲	80% 泵冲	100% 泵冲	40% 泵压	80% 泵压	100% 泵压
额定						
U/V	317	617	767	757	764	767
I_d/A	1720	1720	1720	688	1376	1720
$\alpha(^{\circ})$	67	40	18.8	20.8	19.4	18.8
γ/rad	0.03	0.05	0.08	≈ 0	0.07	0.08
I_1/A	1342	1342	1342	537	1074	1342
I_5/A	268	268	267	107	214	267
I_7/A	191	191	189	77	153	189
I_{11}/A	121	120	118	49	97	118
I_{13}/A	76	101	99	41	82	99
I_{17}/A	78	77	73	32	63	73
I_{19}/A	70	68	64	28	56	64
I_{23}/A	57	55	50	23	46	50
I_{25}/A	52	50	45	21	43	45

3.1.2 多泵运行

当两台或者三台泥浆泵运行在80%的额定泵压和冲数但相互之间略有误差时,计算的基波及谐波电流数据如表7所示。

表7 两台、三台泥浆泵在80%额定工况时电流数据

工况	额定泵冲、80%额定泵压		额定泵压、80%额定泵冲		
	数量/台	2	3	2	3
I_1/A		2 148	3 222	2 684	4 026
I_5/A		388	550	485	688
I_7/A		252	339	315	423
I_{11}/A		143	180	177	223
I_{13}/A		118	147	146	181
I_{17}/A		89	109	109	133
I_{19}/A		79	97	96	118
I_{23}/A		61	74	71	87

3.1.3 绞车运行

当绞车需要的输入功率为2 000 hp、允许过载(处理卡钻事故)1.36倍、运行在40%额定转速时,以上各数据分别为: $I_d = 2\,926\text{ A}$, $\alpha = 66^{\circ}$, $\gamma = 0.06\text{ rad}$, $I_1 = 2\,282\text{ A}$, $I_5 = 456\text{ A}$, $I_7 = 326\text{ A}$, $I_{11} = 211\text{ A}$, $I_{13} = 180\text{ A}$, $I_{17} = 140\text{ A}$, $I_{19} = 127\text{ A}$, $I_{23} = 108\text{ A}$, $I_{25} = 100\text{ A}$ 。

3.2 变频钻机

泥浆泵在额定工况时拖动单电动机(1 200 kW)需要的电流为 $I_{de} = 1\,381\text{ A}$;绞车在额定、1.36倍过载工况时拖动双电动机(800 kW)需要的电流分别为 $I_{de} = 1\,752\text{ A}$ 、 $I_{dg} = 2\,383\text{ A}$ 。当变频装置由于效率的原因降低的功率由输出电压的提高来补偿,绞车配 $2 \times 1\,000\text{ kW}$,泥浆泵分别配 $1 \times 1\,200\text{ kW}$ 和 $1 \times 1\,400\text{ kW}$ 变频器时,基波和谐波电流的计算如下。

3.2.1 单泵运行

当一台泥浆泵工作在表5的负载率时,谐波电流的计算数据如表8、表9所示。

3.2.2 多泵运行

当两台或者三台泥浆泵运行在80%的额定泵压(以1 200 kW变频器为准,因其输出电流的限制以及便于比较)但相互之间略有误差时,计算的基波及谐波电流数据如表10所示。

3.2.3 绞车运行

当绞车需要的输入功率为2 000 hp、允许过载(处理卡钻事故)1.36倍、运行在40%额定转速,在以下配置(变频器工作在主从控制)时,各次

表8 不同负载率时谐波电流的计算数据 (1 200 kW)

(单位: A)

额定泵压 电流	23.0%	46.0%	69.0%	89.3%
I_1	330	660	978	1 270
I_5	191	292	356	406
I_7	99	113	113	116
I_{11}	33	52	69	79
I_{13}	22	29	34	44
I_{17}	17	23	29	32
I_{19}	10	15	22	24
I_{23}	8	10	13	17
I_{25}	6	9	11	15

表9 不同负载率时谐波电流的计算数据 (1 400 kW)

(单位: A)

额定泵压 电流	25.6%	51.2%	76.8%	99.4%
I_1	368	735	1 089	1 414
I_5	212	325	396	452
I_7	110	126	126	129
I_{11}	37	58	76	88
I_{13}	24	33	38	49
I_{17}	18	25	33	35
I_{19}	11	17	24	27
I_{23}	8	12	14	18
I_{25}	7	10	13	17

表10 两台、三台泥浆泵在80%额定泵压时电流数据

工况	额定泵冲、80%额定泵压					
配置功率	1 × 1 200 kW			1 × 1 400 kW		
泵数量/台	1	2	3	1	2	3
I_1/A	1 136	2 275	3 413	1 135	2 270	3 405
I_5/A	383	694	880	421	762	967
I_7/A	115	190	242	127	209	268
I_{11}/A	74	109	136	81	120	148
I_{13}/A	39	56	69	43	62	76
I_{17}/A	31	44	54	34	48	59
I_{19}/A	23	32	40	25	35	43
I_{23}/A	15	21	26	16	23	28
I_{25}/A	13	18	23	15	21	26

谐波计算数据如表11所示。

3.3 转盘/顶驱运行

由于转盘/顶驱没有与绞车同时工作在最大功率的正常钻井工况，且其运行时的功率与绞车在

表11 绞车在额定、过载1.36倍时电流数据

绞车功率/kW	1 470(2 000 hp)	
配置电动机	2 × 800 kW	
拖动变频器	2 × 1 000 kW(6SL3720-1TG41-0AA3)	
工况	额定	过载1.36倍
电动机工作电流/A	1 752	2 383
变频器额定/(过载)/A	1 025/1 500	1 025/1 500
负载率 $I_O/I_{ON}(\%)$	85.5	116.2
I_1/A	1 791	2 454
I_5/A	608	785
I_7/A	184	223
I_{11}/A	118	152
I_{13}/A	62	86
I_{17}/A	49	61
I_{19}/A	37	47
I_{23}/A	23	32
I_{25}/A	21	29

额定/过载及泥浆泵的额定运行相比较小，产生相应的谐波也较小，与三台泥浆泵同时运行时，泵在80%到额定泵压运行时的谐波基本上可以包括了转盘/顶驱，因此略去其计算。

4 其他计算

4.1 直流钻机

当泥浆泵工作在额定泵冲、80%额定泵压，绞车在40%额定转速、1.36倍过载时，需要电网提供的有功功率、视在功率、功率因数及无功功率的计算值如表12所示。

表12 直流钻机绞车、泥浆泵工作时电网数据

转速	绞车40%额定转速	泥浆泵额定泵冲	
负载	1.36倍额定	80%额定泵压	
电动机数量/台	2	2	3
I_1/A	2 282	2 148	3 222
$\alpha(^{\circ})$	66	19.4	19.4
γ/rad	0.06	0.07	0.07
$\varphi_1(^{\circ})$	67.72	21.40	21.40
$\cos \varphi_1$	0.38	0.93	0.93
ν	0.958	0.959	0.959
λ	0.364	0.892	0.892
P/kW	901	2 076	3 114
$S/kV \cdot A$	2 476	2 327	3 491
$Q/kvar$	2 306	1 051	1 578

4.2 变频钻机

相同于直流钻机的条件,变频钻机需要电网提供的有功功率、视在功率、功率因数和无功功率的计算值如表13所示。

表13 变频钻机绞车、泥浆泵工作时电网数据

转速	绞车40%额定转速		额定泵冲			
变频功率/kW	1 000		1 200		1 400	
电动机数量/台	2		2	3	2	3
负载	额定	1.36倍	泥浆泵80%额定泵压			
I_t/A	1 752	2 383	2 275	3 413	2 270	3 405
$\cos \varphi_1$	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
ν	0.92	0.92	0.951	0.964	0.94	0.963
λ	0.88	0.88	0.91	0.93	0.90	0.92
P/kW	1 748	2 237	2 269	3 405	2 359	3 397
$S/kV \cdot A$	1 986	2 702	2 494	3 661	2 621	3 692
$Q/kvar$	943	1 515	1 036	1 346	1 142	1 447

4.3 电网总体

当泥浆泵工作在额定泵冲、80%额定泵压,井场辅助用电工作在最大有功功率时,按矢量法计算的电网的功率因数、有功功率、视在功率及无

功功率值如表14所示。

表14 考虑井场辅助用电时电网总体的计算数据

辅助用电工况	最大有功600 kW, 功率因数0.8			
泵况	额定泵冲、80%额定泵压			
钻机	直流		变频(1 200 kW)	
工作泵数/台	2	3	2	3
电网电压/V	600			
电网电流/A	2 953	4 072	3 105	4 227
相位角 $\varphi(^{\circ})$	29.5	28.9	26.4	25.5
λ	0.87	0.88	0.9	0.9
P/kW	2 670	3 723	2 904	3 954
$S/kV \cdot A$	3 069	4 232	3 227	4 393
$Q/kvar$	1 513	2 012	1 407	1 915

4.4 电压畸变

对常规5 000 m以上的钻机,电网一般由3~4台3512B(1 310 kW)+SR4(1 900 kW·A)的柴油发电机组组成,以直流钻机为例,当泥浆泵工作在额定泵冲、80%额定泵压,井场辅助用电工作在最大有功时,谐波电压的畸变率、谐波电压及电压总畸变率计算^[1]值如表15所示。

表15 电网谐波电压、总畸变率计算数据

工作发电机组数/台	2		3		4	
泥浆泵工作数量/台	2	3	2	3	2	3
基波电压/V	600					
5次/ $\%$, V	0.212, 12.7	0.030, 18.1	0.142, 8.5	0.201, 12.0	0.106, 6.4	0.150, 9.0
7次/ $\%$, V	0.193, 11.6	0.260, 15.6	0.129, 7.7	0.173, 10.4	0.096, 5.8	0.130, 7.8
11次/ $\%$, V	0.172, 10.3	0.217, 13.0	0.115, 6.9	0.144, 8.7	0.086, 5.2	0.108, 6.5
13次/ $\%$, V	0.168, 10.1	0.209, 12.5	0.112, 6.7	0.139, 8.4	0.084, 5.0	0.105, 6.3
17次/ $\%$, V	0.166, 9.9	0.203, 12.2	0.110, 6.6	0.135, 8.1	0.083, 5.0	0.101, 6.1
19次/ $\%$, V	0.164, 9.8	0.202, 12.1	0.109, 6.6	0.134, 8.1	0.082, 4.9	0.101, 6.1
23次/ $\%$, V	0.163, 9.8	0.201, 12.1	0.109, 6.6	0.134, 8.1	0.082, 4.9	0.101, 6.1
25次/ $\%$, V	0.167, 10.0	0.202, 12.1	0.111, 6.7	0.135, 8.1	0.083, 5.0	0.101, 6.1
总谐波电压 $U_{H/V}$	29.9	38.5	20.0	25.7	15.0	19.3
总畸变率THD _t (%)	5.0	6.4	3.3	4.3	2.5	3.2

6 结束语

通过以上各节的叙述及计算,对用三相变流桥为供电电源的直流或者变频电动钻机,可以得到以下结论。

1) 电网上都存在谐波电流,其大小随钻井工

况需要的功率大小而变化,在同一工况(如两或三台泥浆泵工作在80%额定泵压)时,变频钻机需要的谐波电流、总电流及电网容量都比直流钻机的大,也可说相对耗能较多。

2) 电网上都存在功率因数,其大小随输出电压和负载电流的变化而变化,但直流钻机主要

随输出电压^[3]（对应于转速）变化，在0.1~0.9之间范围较大；变频钻机主要随输出电流变化，在0.80~0.93之间范围不大。

3) 配置电网时，不但要满足有功的需要，同时要满足容量（或者功率因数）的需要。配置发电机容量时功率因数的确定，应根据钻机使用时的工况决定，过大过小都不合适。当配置确定后在实际使用中不满足特殊工况时，可通过调整操作工艺使电网达到要求。

4) 对由变压器供电组成电网的网电钻机，由以上各表计算结果可知，对5 000 m以上的直流或者变频钻机，在正常的钻井工况下，功率因数及各次谐波的注入量均达不到国家标准规定的负载接入要求^[1]。

5) 对由柴油发电机组组成电网的常规钻机，谐波主要对发电机的制造和选型有影响。谐波涡流发热和低功率因数配容都需要特殊制造或提高容量等级。

6) 对接于600 V电网的主变压器和其他控制变压器，当谐波特别严重（如倒划眼工况的绞车、转盘/顶驱、泥浆泵同时工作且功率较大或者变流调速负载占到当时电网容量的80%以上）而使电网电压发生畸变（ $THD_U > 5\%$ ）不再保持正弦波形时，畸变的电压虽然对井场辅助用电设备的运行影响不大，但对计算机或者其他电子设备中含有滤波、开关等电路中的电容有较大影响，可使其

发生谐振而过热烧毁。

7) 应对谐波和低功率因数的最佳措施需要根据电网类型而定。对于网电钻机，最好配置SVG，与其他常规的解决措施相比，该措施将增加运行（IGBT器件的PWM开、关）能耗和配套成本；对于常规钻机，除上述措施外，由于谐波和功率因数在正常的钻探工况下只影响发电机的选型，因此也可以选择提高发电机容量等级或特殊制造来应对。

8) 对采取发电机增容措施来应对谐波的钻机，无论谐波是否大到影响发电机的输出电压，为保证精密电子设备（如测、录井计算机系统，电控系统的上位计算机系统和UPS等）的正常工作，除选用抗谐波能力较高的电子设备外，其供电回路应特殊处理，如配置电源净化器或APF等。

参考文献

- [1] 天津电气传动设计研究所. 电气传动自动化手册 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2005: 418-744.
- [2] 朱奇先, 田斌, 方永春, 等. 石油钻机电控 (VFD、SCR) 系统的短路计算 [J]. 电气传动, 2016, 46 (5): 81-85.
- [3] 冯益强, 刘涛, 等. 电动钻机降低油耗方法研究 [J]. 电气传动自动化, 2013, 35 (5): 5-7.

(收稿日期: 2016-12-21) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告