

基于降本、提效、节能的石油钻机 电控系统配置

冯益强¹, 蒋明², 李红飞³, 刘晋雷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, 甘肃 天水 741020;
2. 中国石油渤海钻探第四钻井公司, 河北 任丘 062550; 3. 中国石油技术开发公司,
北京 100028; 4. 中石化海洋石油工程有限公司上海钻井分公司, 上海 201206)

摘要:为适应石油钻采装备的市场价格竞争以及绿色运行要求,在保证钻机性能的前提下,降低制造成本和提高运行效率的设计是一条重要途径。以电动钻机为例,对于电控系统,从方案的设计上提出了主辅网合并、交直流混合配置、一体化、RT/TD切换的配法改进措施;从提效、节能等绿色运行要求上,提出了辅机并网、变频器制动、APF滤波、下钻能量储存、再利用的配置上的应对措施。论述了这些措施的技术设计、优缺点、加工制造要求、效果以及实施的可行性。

关键词:主辅网合并;交直流混合;一体化设计;转盘/顶驱切换;辅机并网;变频器制动;动态有源滤波;储能再利用

中图分类号: TM64; TM72 文献标识码: A DOI: 10.19457/j.1001-2095.20170102

Oil-drilling Rig Control System Configuration Based on the Purpose of Cost Reduction, Efficiency Improvement and Energy-saving

FENG Yiqiang¹, JIANG Ming², LI Hongfei³, LIU Jinlei⁴, ZHU Qixian¹

- (1. State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology, Tianshui 741020, Gansu, China;
2. The 4th Drilling Company of CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Renqiu 062550, Hebei, China;
3. China Petroleum Technology & Development Corporation, Beijing 100028, China; 4. Sinopec
Offshore Oilfield Services Company Shanghai Drilling Division, Shanghai 201206, China)

Abstract: Considering the market price competition and environment-friendly operation requirements of oil drilling equipment, the design based on cost reduction and efficiency improvement is an important way under the premise of ensuring the rig performance. Taking electric rig as an example, the thesis from the point of design schemes put forward the following improvement solutions such as grid connection of the main and auxiliary generators, AC-DC hybrid configuration, integrated design and RT/TD switching configuration. From the point of environment-friendly operation requirements of efficiency improvement and energy-saving, it also proposed the following solutions such as auxiliary generators grid connection, inverter brake, APF, drilling energy-stored and reusing. Finally it illustrated the technical design, the advantages and disadvantages, manufacturing requirements, the effect and feasibility of implementation about these solutions.

Key words: grid connection of the main and auxiliary generators; AC/DC hybrid; integrated design; rotary table/top drive switching; auxiliary generators grid connection; inverter brake; dynamic active power filter; energy-stored reusing

随着国际、特别是国内石油钻采装备制造行业市场竞争的加剧,钻机的价格持续降低,而对其使用过程中降耗提效、节能环保等绿色运行要求却普遍提高。为适应这些变化,需要装备制造者在方案设计、生产管理、加工制造等多方面采

取应对措施。本文以电动钻机为例,以兼顾上述要求为目标,在不降低技术性能并满足使用规范的前提下,从改进配法和绿色运行方面对电控系统(SCR/VFD)的方案设计进行研究,以供同行参考和探讨。

1 电控系统

石油钻机的电控系统,包含的功能单元和数量随钻机的大小以及划分方法的不同而不同。以大多数具有自备电站(柴油发电机组)的电动钻机而言,最少应包括动力(柴油发电机组的调速、调压、并网)控制、传动(绞车、转盘/顶驱、泥浆泵等机械的拖动)控制、供电(钻井辅助机械等的配电)控制、综合(钻井工艺、逻辑操作、各种保护等)控制等主要功能单元以及相应的拖动电机,一般将控制的功能单元集成在1个模块内,简称SCR(直流)/VFD(交流变频)。常规7000 m电动钻机的电控系统单线图如图1所示。

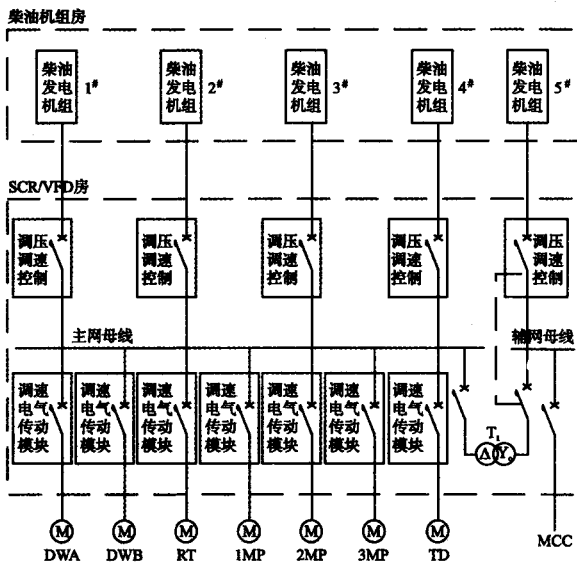


图1 常规7000 m电动钻机电控系统单线图

Fig.1 Single-line diagram of electric control system for conventional 7000 m electric drilling rig

图1中,柴油机组房中的每台机组、SCR/VFD房均为撬装模块,独立安装;DWA, DWB, RT, 1MP, 2MP, 3MP, TD依次为绞车、转盘、泥浆泵、顶驱的拖动电机,随相应的机械安装。对主要的电控系统(SCR/VFD房内)部分,从以下2个方面对方案设计提出改进,以达到降本提效的目的。

2 改进配法

从装备制造的角度,在保证钻机性能的前提下,为进一步降低成本,对配法的改进措施如下。

2.1 主辅网合并

2.1.1 常规配法

如图1所示,绝大多数电动钻机的供电电网

一般配有主网和辅网,主网制式一般为三相3线50/60 Hz, 600 V,用于主要钻井机械的供电电源;辅网制式一般为三相4线50 Hz/400 V或60 Hz/480 V,主要用于辅助钻井机械的供电。正常工作时辅网电源通过1台或2台600 V/400 V(50 Hz)或600 V/480 V(60 Hz)的变压器由主网获得,变压器的容量随钻机的大小(1500~9000 m)约在400 kV·A到1500 kV·A之间。

2.1.2 优缺点

这种方案和配法已经成为传统和习惯,配置辅网的优点在于大量MCC电机和照明器材有标准产品可供选取,但缺点是需要1台中间变压器联网,这将增加钻机成本并占用电控房里宝贵的安装空间以及运行时增加损耗。

2.1.3 改进方案

对于50 Hz的电网,为克服这些缺点,比较有效的改进方案是取消中间变压器、主辅网合并。

2.1.4 问题及措施

合并后带来的首要问题是600 V的MCC电机难以选取。解决的措施是将原来380 V/50 Hz电机的接法由三角形改为星形,并调整供电电源的电压使其每相绕组上外加电压不变,则其输出转速、转矩、功率与改变前完全一致,此时外加电源的线电压应为 $U_1 = \sqrt{3} \times 380 \approx 660 \text{ V}$,考虑到线路压降、损耗并靠近系列规格,电网电压可选择为690 V。

其次的问题是对照明器材选取的影响,由于照明电源的安全要求较高且需独立,按照最新的规范要求,即使不合并主辅网和调整电压也需要配置1台变压器。因电控房对安装空间有严格的限制,变压器一般需订做,订做时主、副边电压可以按新要求,因此这个问题实际上并不存在。

最后是电压调整后负载情况对电网品质的影响,其结果将随钻机的大小、拖动电机的功率以及交直流情况的不同而异。对于5000 m以上的直流钻机,由于主拖动电机普遍为GE752R或YZ08A串励系列DC 750 V, 1000 r/min, 800 kW参数的配置,当电压调整到690 V时,在相同的电机转速下,直流调速电气传动模块的相角因数(相应于电网功率因数中的位移因子)比600 V时均要降低,例如额定转速(1000 r/min, DC 750 V)下只有 $\cos \alpha_1 = 750 / (1.35 \times 690) = 0.63$,比电压为600 V时的 $\cos \alpha_2 = 750 / (1.35 \times 600) = 0.72$ 降低约

13%。由于谐波因子只与负载电流有关,因此其影响与电压调整前基本相同或略有降低。由于传动电机类负载在钻进工作时占电网容量的65%以上,因此总的结果将使电网的功率因数相应降低,导致同等有功需求时电流增大,总的损耗增加,解决的措施是配置APF装置。对于交流变频钻机,当供给逆变器的直流电源由二极管变流装置提供时,位移和谐波因子对电网功率因数的影响与是否调整电压无关,但调整电压后直流电压会从以前的810 V升高到930 V,正好符合常规配置的逆变器对输入电压的要求,将使其输出功率比600 V时提高约15%,带来有利的影响。

2.1.5 降本效果

主辅网合并后节省的器件为联网变压器、原副边断路器控制柜以及连接电缆等其他材料,降低的成本随钻机的大小不同而不同,对于5 000 m(变压器容量1 250 kV·A)以上的钻机,大约在25万元以上。

2.1.6 可行性

实现改进配法需要重新选取供电和用电装置。具体来说,对于发电机的选型,由于输出690 V的电压属标准系列产品,相同容量的机组价格基本一致;对于CAT35X+SR4系列的机组配置,虽然690 V的输出电压不是其标准产品,但要求其调整并不困难,在相同容量下,690 V的发电机线圈用铜量要少于600 V的,因此价格应该基本不变;对于调速电气传动模块的选型来说,由于600 V与690 V的输入电压均属低压范围($\leq 1\ 000\text{ V}$),对装置的耐压和绝缘等级要求一样,功率不变不会增加成本;对于MCC的控制电器来说,虽然电压提高了,但在相同负载下电流降低了,因此器件的价格也不会增加。综上所述,供、用电装置及器件都可方便选取且其控制策略不变,因此实施改进的配法无论在技术上还是在成本造价上都没有障碍。

2.2 交直流混合

这里的交直流混合指拖动钻井机械(绞车、转盘、顶驱、泥浆泵)的调速电气传动系统既有交流变频的,也有直流的。

2.2.1 常规配法

如图1所示,对于调速电气传动控制系统,常规的配法为全是直流,或者全是交流,即控制钻井机械的调速电气传动模块和拖动电机均为直

流或均为交流变频。

2.2.2 优缺点

常规配法的优点就是交直流钻机固有的优点,即相较于同等规格的交流变频钻机,直流钻机的电控系统造价低、设计制造简单、SCR房数量少、单位体积功率密度大,直到12 000 m的钻机,仍然可以集成在一个长14 m以内的电控房里;缺点是电网的功率因数低、谐波多、损耗大、调速范围小,下钻能量回馈的控制复杂;在机械方面,绞车的传动机构多、体积大、重量重、需要配置制动装置、安装对正要求高等。与此相反,交流变频钻机的缺点是电控系统造价高、设计制造复杂、安装要求高、VFD房(限于铁路、公路的运输要求,5 000 m以上的钻机最少在2个或以上)数量多;优点是电网的功率因数高、损耗小、调速范围宽、下钻能量回馈控制容易;在机械方面,绞车的传动机构少、体积小、重量轻、无需制动装置(制动功能由电控系统完成)。但无论那种钻机,相较于混合配置,都具有维护、保养、备件的品种单一,便于设备管理的优点。

2.2.3 混合配法

将泥浆泵的调速电气传动系统配置为直流,而将绞车、转盘/顶驱配置为交流的混合配法,在最大程度上发挥了交、直流钻机的优点而避开了其缺点,是方案设计上的有效降本措施。这是由于泥浆泵需要的调速范围较小、要求的控制精度较低但功率较大,配置为直流系统既满足使用要求又性价比最高、占用电控房空间最少;对绞车、转盘/顶驱需要的调速范围宽、动态响应快、控制精度高、功率较小且最好由电控装置来制动的要求,配置为交流变频系统最为合适。

2.2.4 降本效果

以标配的7 000 m变频钻机(即3台1 176 kW的泥浆泵由3台1 200 kW的逆变器对应拖动)为基准比较,每台逆变器的价格大约在60万元左右,而功率为1 700 kW(不做任何变动可以直接用于1 617 kW的泥浆泵)的直流拖动装置,价格不会超过30万元,因此直流比变频降低约90万元左右,电缆及其连接件的降低在6万元以上;另外,对于5 000 m和7 000 m钻机,混合配置时,可以只要1个电控房,相较于标配的2个,包括房体、空调、连接电缆、辅材以及运输费用等,还可降低约35万元以上,总的成本降低约在130万元以上,降本效果比较显著。

2.2.5 综合结论

对于7 000 m的电动钻机,混合配法时电控系统的成本比直流高约100万元,比变频低约130万元;绞车、转盘/顶驱的性能与变频钻机的相同,泥浆泵的与直流的相同;对电网功率因数中位移因子的影响低于变频而高于直流,谐波因子基本不变。相较于常规配法,除去维护、保养、备件品种较多的缺点外,交直流混合配置的电控系统,既达到了现代钻机的技术水平(体现在绞车、转盘/顶驱上),又显著地降低了成本(体现在泥浆泵上),电网的品质虽然不高但仍然可以接受,且设计、制造没有任何难度,使用操作也没有变化,因此在5 000 m以上的钻机中值得采用、推广。

2.3 监控一体化

在深井电动钻机的机、电、液、气、仪表、通讯、视频等一体化设计方面,无论是在一体化的程度上还是在技术水平上,国内钻机与国际名牌相比,均有一定的差距。国内的钻机成套商限于总体设计的能力和用户的一些传统习惯,成套思路大多是采购相关专业供应商的产品,简单的集成在一起,这种现象在司钻房里表现尤为突出。比如,卡特的柴油发电机组自带有1套参数显示系统,电控系统也配有功能相同的1套系统;为了显示转盘/顶驱的转速、转矩,泥浆泵的冲数、流量,大钩的钩载、高度等数据,仪表供应商配置了相应的检测传感器,电控系统也配有这些传感器;绞车、转盘/顶驱、泥浆泵、盘刹、惯刹、液压站、机械上碰下砸保护等装置的控制按钮虽然都在司钻房,但操作和保护基本上是各自为政,相互间的协调配合和自动联锁的一体化设计水平不高。以上这些重叠的配置不但增加了硬件成本,而且增加了安装和维护的成本,多余的硬件和单独的操作增加了故障率,也给安全、可靠运行带来了隐患。随着对钻机性能要求的不断提高,包括电控系统在内的深度一体化设计非常必要,虽然节省的硬件直接成本有限,但却降低了运行和维护的成本,提高了钻机的可靠性,也是降本措施之一。实现真正的监、控一体化,在技术设计和制造加工上没有难度,只要全面提高总体设计水平和能力,就能达到既提高性能又降低成本的目标。

2.4 RT/TD切换

RT(转盘)和TD(顶驱)在常规的钻机配置

里,机械和电气部分为2套完全独立的系统,但完成的是同一个钻进功能。对于固定顶驱配置的电动钻机或者海上钻井船/平台,由于RT/TD不同时工作,将RT和TD的供电装置及控制和操作的软、硬件与电控系统合并配置、统一设计,省掉TD控制房,只用1套调速电气传动模块切换供电并集成在电控房内,是有效降低成本的一种配法。切换供电的单线图如图2所示。

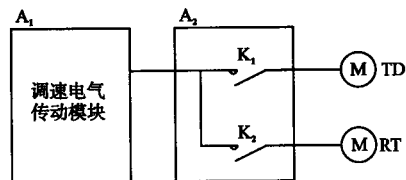


图2 RT/TD切换供电单线图

Fig.2 Single-line diagram of RT/TD switching power supply

图2中,A₁为常规的调速电气传动模块(直流或交流变频)、A₂为切换模块,主要由2台接触器(直流钻机时为2极、交流变频时为3极)及其控制回路组成,M为RT/TD机械的拖动电机(直流或交流)。

这种配法对RT和TD实现的功能与独立配法完全一致,性能指标相同,在技术和加工制造上没有难度。切换模块增加的成本与节省TD电控房相比几乎可以忽略,降低的成本随钻机的大小不同而异,对于5 000 m以上的钻机,大约在150万元以上,降本效果显著。因此对不需要移动顶驱的钻机,这种配法值得采用、推广。

3 绿色运行

从用户使用的角度,为了进一步达到降耗、提效、节能等绿色运行,对配法提出了改进要求。

3.1 辅机并网

具有自备电站的深井电动钻机,一般在400 V(50 Hz)或480 V(60 Hz)网侧都配有电压相同、容量在500 kV·A左右的辅助机组与之并联,如图1中的5[#]柴油发电机组所示。行业的习惯配法不允许它和经过T₁提供的电源同时供电。然而,在许多的钻井过程中,常有负载需求大于1台但小于2台能力的工况,限于习惯的配法此时只能使用2台主机并网,造成每台主机的负载率降低、油耗升高。如果改变习惯允许辅机并网供电,不但满足了负载需求,还可以节省燃油。这是由于主机的功率一般在1 000 kW以上,较400 kW左右的辅机油耗率在低负载率时高出很多,使用1

主1辅并网,可以提高主、辅机的负载率从而节省燃油,同时也充分地发挥了辅机能力,避免了其长期闲置而造成机组间工作时间的不均衡。实现辅机并网,对辅机的配法除容量和电压不同外,无论是气启动还是电启动方式,其余的要求与主机完全一致,在控制的逻辑操作和并网保护的技术上没有难点。这种配法和用法,虽然适应的工况范围不多、节省的燃油有限,但毕竟是一条降耗、提效、节能的有效途径,而且没有任何负面影响,因此值得在电控系统的常规配法上采用、推广。

3.2 变频器制动

变频钻机能耗制动系统中的制动装置,限于成本的考虑,常规的配法一般选用阈值控制的斩波器模块并联。在钻机的实际使用中,无论是行业上常用的西门子(6SE71, S120系列)产品,还是ABB(ACS800系列)的产品都有模块经常损坏的情况,而且随着钻井深度的增加、绞车速度的提高而普遍,不但造成运行和维护成本增加,而且随机出现的损坏故障直接威胁到钻井的安全。模块损坏虽然有成套商设计、使用方面的原因,但最主要的在于其自身固有的缺陷,即模块内部全控器件与并联的直流滤波电容之间的铜箔连线存在有无法消除的分布电感 L ,高频率的通断过程引起很高的负载制动电流变化率(di/dt),将产生感应电压 $u=L \cdot di/dt$,这个电压会首先作用于物理上距离全控器件最近的电容上,使其产生较大的纹波电流而过热,热量累积到一定程度时有可能引起电容爆裂并使整个模块损坏,无论如何改善电容的外部散热以及增加模块的并联数量,均不能从根本上消除随时有可能出现的隐患。为了彻底解决这个问题,采用变频器制动配法是最有效的措施,即选用功率合适、性能规格与绞车变频器相同的变频器作为制动装置。这种配法虽然增加了成本,但使钻机的安全可靠得到了极大的提高,对9 000 m及其以上的变频钻机,只有这种配法才能满足制动性能的要求。因此在复杂地质条件下钻井、对安全性要求较高以及较大的钻机上,制动装置应该配置为变频器制动。

3.3 配置APF

无论是直流还是变频电动钻机,常规配法的电控系统中都含有半控或不控的三相桥变流装置,由于不控或半控器件的非线性工作特性,在

变流装置工作时将使电网的品质(功率因数 $\cos \varphi = \lambda \cdot \cos \alpha$ 、电流畸变率THDI)降低,降低的程度随钻机的种类(直流、变频)和负载电流的大小而不同,但 $\cos \varphi_{\max} \leq 0.75$, $\text{THDI}_{\min} \geq 20\%$,这样的指标,对于使用网电的钻机根本达不到接入电网($\cos \varphi \geq 0.90$, $\text{THDI}_{\max} \leq 5\%$)的要求;对于自备电站的钻机,过低的功率因数使得同等有功输出时发电机电流增大、柴油机功率得不到有效利用、热耗增加、油耗上升,过高的电流畸变率将使电压波形失真,导致MCC电机转矩脉动、温度升高、照明灯闪烁、寿命缩短、监视、录井用计算机工作不稳定甚至损坏。对此问题,早期的解决措施是配置无源补偿和滤波装置,但由于钻机负载经常波动、起下钻时变化迅速,补偿性能达不到要求,经常出现过补、欠补甚至发生谐振烧毁装置,因而不得不放弃;为了使钻机在这些不利因素存在时仍然能够工作,采取的措施是提高供、用电装置的能力等级(即增加发电机容量,提高一级MCC电机功率),备足照明器材,给录井以及计算机电源单独滤波、净化或者配置专用的发电机组;随着电力电子器件、大规模集成电路以及现代控制技术的发展,动态有源滤波器(APF)以其响应快、效率高、滤波次数多、效果好、不会发生谐振等优点在工业电网的滤波上得到了普遍应用。因此为彻底消除这些不利因素,给钻机的电控系统配置APF,是提高电网品质、降低运行成本的有效措施。配置APF虽然要增加成本,但可以从降低柴油发电机组、MCC电机的装机容量等方面的降本以及节省的燃油中得到部分补偿。从钻机长期的降耗、节能、环保等绿色运行方面的要求以及技术进步后APF的价格必将降低的趋势考虑,应该为今后的钻机配置APF。

3.4 配置储能系统

钻探井时下钻过程中钻具释放的重力势能,无论是网电还是自备电站的钻机,既没有回馈给电网,又没有储存再利用,都以机械或电气方式转换为热能排放了。对于变频钻机,由于机电能量相互转换非常方便而又无需增加硬件,因此配置储能再利用系统就能够对此加以部分利用从而达到节能的目的。图3所示为1种配法示意单线图。其中GEN为系统主电源;T为变压器; A_1 为AC/DC交直流电能可逆变换器; A_2 为DC/DC直流电压变换器; A_3 为超级储能电容器; A_4 为AC/

DC变流器;A₅为检测控制系统;A₆为绞车变频拖动系统,下钻时将交流电能转换为直流电能;A₇为能耗制动系统,消耗下钻时无法利用的能量;A₈为大钩及绞车机械系统,下钻时将钻具重力势能转换为电机转子动能;DC-Link为直流母线;DWA,DWB为拖动绞车的变频电机,下钻时将转子机械能转换为交流电能;MCC为MCC负载。储能再利用系统由A₁,A₂,A₃(CN),A₄,A₇(BK)组成。

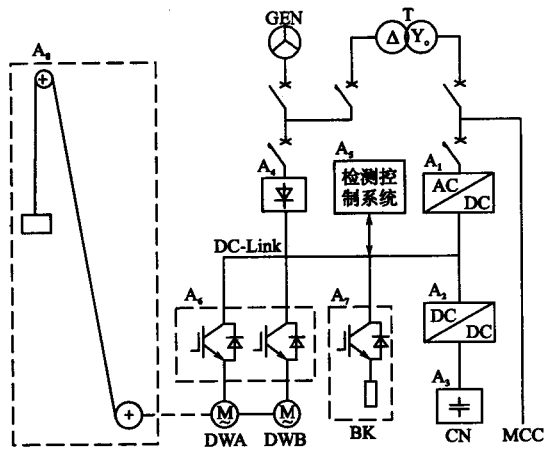


图3 与储能再利用相关的机械、电控系统单线图
Fig.3 Single-line diagram of mechanical and electric control system related to energy-stored reusing

先短时储存回馈能量再加以利用的技术已经在由变频器拖动的港口装卸机及起重机上得到了广泛应用,节能效果显著,但在钻机上还没有实际的应用,主要原因是钻机的下钻次数没有装卸机和起重机的多,节能效果有限,靠下钻回馈节能的方式来收回储能装置成本的时间超过了储能电容器的使用寿命。随着超级储能电容器制造技术的进步、储能装置价格的降低,给变

频钻机配置储能再利用系统充分利用下钻能量将成为基本的要求。

4 结论

本文提出的降低钻机电控系统制造成本的主辅网合并、混合配置、一体化设计、RT/TD切换措施,他在控制技术上没有难点,在加工制造上没有难度,在性能指标上没有降低,在操作使用上没有改变,但在降本效果上比较显著,因此具有非常实用的参考价值。从绿色运行角度对电控系统提出的辅机并网、变频器制动、APF滤波、下钻能量利用的要求配法,技术成熟,实施方便,虽然或多或少都要增加成本,但都能够达到降耗、提效、节能、环保或降低运行维护成本、提高钻机安全可靠性的目的,也具有一定的实用参考价值。

参考文献

- [1] 冯益强,刘涛,朱奇先,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.
- [2] 方永春,师远征,何龙,等. 辅发并网技术在电动钻机中的应用[J]. 石油和化工设备,2015(6):89-93.
- [3] 朱奇先,张贵华,张振中,等. 变频钻机能耗制动系统研究[J]. 电气传动,2015,45(5):75-77.
- [4] 杨荣,刘浩,朱奇先,等. 1200BC2-14/690制动斩波器应用研究[J]. 电气传动,2014,44(8):72-75.
- [5] 周维维,张东,杜雄,等. 一种新型的串联型有源电力滤波器[J]. 中国电机工程学报,2005,25(14):41-45.
- [6] 陈如恒,沈家骏. 钻井机械的设计计算[M]. 北京:石油工业出版社,1995.
- [7] 魏永武,张燕,代炳晓,等. 变频钻机储能系统设计研究[J]. 电气传动,2014,44(11):73-76.

收稿日期:2015-12-17

修改稿日期:2016-05-15

欢迎订阅《电气传动》(月刊)

《电气传动》创刊于1959年,由天津电气科学研究院有限公司和中国自动化学会共同主办,是我国自动化类和工程技术类具有权威性的核心期刊。本刊以促进科技交流,沟通行业、产品信息,培养人才为宗旨。主要栏目包括:综述和专论、交、直流调速、计算机应用、微机及PLC应用、自动控制理论、自动控制系统、控制技术、设计计算、工业应用等。内容涵盖电气传动自动化最新研究成果、发展动态及新技术、新产品、新器件。是科研院所、工矿企业广大科技人员和高等院校师生发表学术见解、应用经验及学术争鸣的园地,也是了解新产品、新器件、新技术的窗口。

邮发代号:6-85 邮局全年订价:180元 零售价:15.00元