

石油钻机微电网混合储能系统的 协调控制策略

张振中¹,王鹏霄²,杨新华^{2,3,4}

(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 741000;2. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州 730050;3. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室,甘肃 兰州 730050;4. 兰州理工大学电气与控制工程国家级实验教学示范中心,甘肃 兰州 730050)

摘要:针对石油钻机复杂的地质环境易形成跳钻或溜钻现象,提出将混合储能应用于石油钻机微电网以改善电能质量。基于蓄电池和超级电容不同的储能特性,为使功率合理分配,提出一种自适应滤波常数的控制策略。该策略根据储能装置的工作状态实时修正输出功率,并设置了过充过放及最大限值保护,使储能单元运行在合理区间。仿真结果表明该策略提高了储能装置的性能,延长了储能装置的运行寿命,且增加了石油钻机微电网系统的稳定性。

关键词:石油钻机;混合储能系统;超级电容;蓄电池;协调控制

中图分类号:TM732 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19103

The Coordinated Control Strategy of Oil Drilling Rig Micro-grid Hybrid Energy Storage System

ZHANG Zhenzhong¹, WANG Pengxiao², YANG Xinhua^{2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology, Tianshui 741000, Gansu, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Process, Lanzhou 730050, Gansu, China; 4. National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon that the oil drilling rigs are easy to form the phenomenon of jumping drills or drift drills in the complex geological environment, the hybrid energy storage applied in the micro-grid of oil drilling rig was proposed to improve the power quality. Based on the different energy storage characteristics of the battery and super-capacitor, in order to make the power reasonable distribution, a coordinated control strategy for adaptive filter constants was proposed. The strategy could modify the output power in real time according to the working state of the energy storage device, and set over-charge, over-discharge and maximum limit protection, so that the energy storage unit could operate in a reasonable range. The simulation results show that the strategy can improve the performance of the energy storage device, extend the operating life of the energy storage device, and increase the stability of the oil drilling rig micro-grid system.

Key words: oil drilling rig; hybrid storage system; super-capacitor; battery; coordinated control

石油钻机通常采用柴油发电机为整个系统提供动力,柴油发电机产生的电能经过电力电子装置后接到直流母线上,但是这种供电方式存在以下问题:

1) 钻具下放作业产生的再生制动能量没有

回收利用,造成了能量的浪费^[1]。同时钻机属于典型的冲击性负载,直流母线电压随负荷的波动而变化,直接影响电网的稳定运行。

2) 石油钻机下钻过程中存在必要的中断时间,该时间柴油发电机工作在空载模式。

基金项目:大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室开放基金课题(SKLLDJ032016019)

作者简介:张振中(1976-),男,高级工程师,Email:zzz6399@163.com

3)为适应冲击负荷,其动力配置通常偏高,使得柴油发电机的效率降低。

已有研究表明:在石油钻机微电网系统上配备一定容量的储能系统,不仅能把下放钻具作业过程中产生的能量储存起来再利用,从而减少对环境的污染,节约能源,而且可以改善柴油发电机的出力情况以及进一步稳定直流母线电压^[2-3]。同时可以减少地质环境变化对柴油发电机组的影响,使得柴油发电机能够平稳运行在最佳区间,从而降低石油钻机运行成本。

混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)的定义由文献[4]在2002年首次提出。混合储能系统通常兼有功率型和能量型2种储能装置的优点,采用该结构能够对波动功率有较好的抑制效果,且能够增强2种储能装置之间的协调配合,从而能够减小能量型储能装置的损耗^[5]。

目前适用于石油钻机微电网的储能元件为蓄电池和超级电容。蓄电池属于能量型储能元件,其特点是能量密度大,但其缺点为功率密度小,充放电效率低,使用寿命短^[6];超级电容器属于功率型储能元件,其特点是功率密度大,响应速度快,循环寿命长,其缺点为能量密度低^[7]。蓄电池和超级电容同时作为石油钻机微电网的储能装置时,能够取长补短,避免了传统单一储能装置的劣势,从而改善了储能装置整体的性能。在石油钻机微电网系统中,储能系统不仅吸收了产生的制动能量,减少了能量的浪费,而且当电机在启动瞬间或者负载突增需要加速时,能供给系统一些功率支撑,使得电网侧的输出降低,同时增加了石油钻机微电网系统的稳定性^[8]。

文献[9]根据蓄电池和超级电容的运行区间采用相对应的控制方式,该方式考虑了2种不同储能装置的实时荷电状态(state of charge, SOC),从而避免了其过充、过放的情况;文献[10]引入了超前的预测控制,首先通过预测控制器给2种储能装置给定一个初始功率值,再通过初始值与参考值之间的偏差来调整储能装置的功率;文献[11]提出了一种滑模控制使得功率在不同储能装置间进行合理分配;文献[12]提出了一种多滞环的调节方法,从而实现了对蓄电池更好的管理;文献[13]设计了一种根据超级电容的端电压预先控制的策略,该策略通过判断储能装置的工作状态来控制其输出方式,从而使得蓄电池和超级电容运行在最佳区间;文献[14]引入了模糊控

制,从而在能量型和功率型2种储能装置间对不平衡功率进行相应的补偿。

虽然国内外对储能系统的控制策略研究较多,但针对不同应用场合应制定合理的控制策略,在石油钻机微电网系统中,储能系统是否投入运行、运行状态、使用寿命以及对波动功率的抑制等都与其控制策略有着直接的关系,因此本文针对石油钻机微电网储能系统,提出一种自适应滤波常数的控制策略,该控制策略根据电池充放电次数及功率限制来修正输出功率,并根据蓄电池充放电状态来调整超级电容的SOC,从而增强各储能之间的协调配合,提高储能装置的性能,同时增加钻机微电网系统的稳定性。

1 混合储能系统的结构

石油钻机主流微电网混合储能系统结构如图1所示,系统由柴油发电机组、蓄电池组、超级电容器组、变换器以及负荷几部分组成。其中柴油发电机组通过AC/DC变换器连接到直流母线,从而为整个石油钻机微电网提供动力。蓄电池组和超级电容组同时作为石油钻机微电网的储能装置,如果直接接到其母线上,储能装置易受母线电压波动的影响,比较难控制,所以储能装置通过2个DC/DC模块接到母线上,从而通过控制DC/DC模块来达到控制储能装置的目的,以确保石油钻机系统稳定运行,蓄电池组和超级电容器组的补偿功率分别为 P_{bat} 和 P_{sc} 。石油钻机微电网的负荷包括直流和交流负荷。

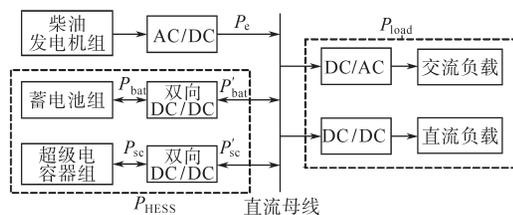


图1 石油钻机直流微电网系统结构

Fig. 1 The structure of DC micro-grid system for oil drilling rig

由图1可得系统的功率关系为

$$P_c + P'_{bat} + P'_{sc} = P_{load} \quad (1)$$

$$P'_{bat} + P'_{sc} = P_{HESS} \quad (2)$$

式中: P'_{bat} , P'_{sc} 分别为经过双向DC/DC变换器蓄电池和超级电容的功率; P_c 为柴油发电机发出的功率; P_{load} 为负荷功率; P_{HESS} 为混合储能系统功率。 P'_{bat} , P'_{sc} 和 P_{bat} , P_{sc} 之间的关系为

$$P'_{bat} = \eta \cdot P_{bat} \quad (3)$$

$$P'_{sc} = \eta \cdot P_{sc} \quad (4)$$

式中: η 为双向DC-DC变换器的效率。

分析中假设2个双向DC/DC变换器的效率相同,均为 η 。

2 混合储能系统的控制策略

储能单元的能量管理是基于不同储能特性的储能装置之间如何补偿不平衡功率。如何协调2种储能装置之间的配合对于保持整个石油钻机微电网系统的稳定至关重要。储能系统的能量管理策略对运行区间、使用寿命等都有一定的影响。本文把混合储能系统的控制策略分为功率分配及调整,过充、过放协调以及功率限值协调控制3部分。图2为混合储能系统控制框图。

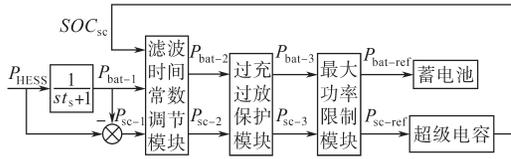


图2 混合储能系统控制框图

Fig. 2 The control block diagram of hybrid energy storage system

2.1 功率初次分配

波动功率根据其性质可分为高频分量和低频分量,而储能装置的储能特性也决定了超级电容器用来补偿高频分量,蓄电池用来补偿低频分量。在石油钻机微电网系统中,超级电容器主要承担不平衡功率 P_{HESS} 中高频部分的补偿工作,以减轻蓄电池的压力;蓄电池用来补偿不平衡功率 P_{HESS} 中的低频分量。本文首先采用低通滤波器来对不平衡功率 P_{HESS} 进行处理,处理之后得到的是蓄电池的指令 P_{bat-1} ,另外一部分则通过超级电容来进行补偿,记为 P_{sc-1} 。其中蓄电池和超级电容的功率指令为

$$P_{bat-1} = P_{HESS} \cdot \frac{1}{st_s + 1} \quad (5)$$

$$P_{sc-1} = P_{HESS} - P_{bat-1} = P_{HESS} \cdot \frac{st_s}{st_s + 1} \quad (6)$$

式中: t_s 为滤波时间常数,根据蓄电池需要补偿的功率的频率进行选取。

2.2 基于SOC的功率再分配

在上述的不同储能装置间的功率初次分配中,仅根据其储能特性对不平衡功率进行了处理,忽略了储能装置的荷电状态,进而影响储能系统的寿命,因此需要根据储能设备的状态,来

及时调整储能设备各自的功率补偿,优先对超级电容进行管理。表1为滤波时间 t_s 调整的方式。

表1 滤波时间常数调整 t_s 方式表

Tab. 1 Adjustment mode table of the filter time constant t_s			
蓄电池功率	超级电容功率	超级电容SOC	t_s
$P_{bat} > 0$	$P_{sc} > 0$	$SOC_{sc} > 0.4$	增加
$P_{bat} > 0$	$P_{sc} < 0$	$SOC_{sc} > 0.6$	减少
$P_{bat} < 0$	$P_{sc} < 0$	$SOC_{sc} < 0.4$	增加
$P_{bat} < 0$	$P_{sc} > 0$	$SOC_{sc} < 0.6$	减少

调整后蓄电池和超级电容的功率指令分别为

$$P_{bat-2} = P_{HESS} \cdot \frac{1}{s(t_s + \Delta t) + 1} \quad (7)$$

$$P_{sc-2} = P_{HESS} - P_{bat-2} = P_{HESS} \cdot \frac{st_s + \Delta t}{s(t_s + \Delta t) + 1} \quad (8)$$

式中: Δt 为 t_s 的调整值。

2.3 过充、过放协调控制策略

2.3.1 过充、过放保护策略

储能系统的过度充电或者过度放电都直接影响使用寿命,因此当储存的能量较少时,应对放电速度加以控制;当处于禁止放电区时,应停止对储能设备的放电管理;同样处于禁止充电区时,应停止对储能设备的充电管理。

图3为储能设备SOC分区示意图。其中蓄电池以及超级电容的SOC均被划为以下5个部分。

禁止充电区	1	禁止充电区	1
充电警戒区	0.8(max)	充电警戒区	0.95(max)
正常工作区	0.6(high)	正常工作区	0.7(high)
放电警戒区	0.4(low)	放电警戒区	0.3(low)
禁止放电区	0.2(min)	禁止放电区	0.15(min)
	0		0

图3 储能设备SOC分区示意图

Fig. 3 SOC partition diagram of the energy storage device

当储能设备的荷电状态满足 $SOC_{bat} < 0.2$, $SOC_{sc} < 0.15$ 时,就无法响应下一时刻的放电请求,从而做出相应的调整。

$$P_{bat-3} = P_{bat-2} \cdot \max\left\{0, \frac{SOC_{bat} - SOC_{min}}{SOC_{low} - SOC_{min}}\right\} \quad (9)$$

$$P_{sc-3} = P_{sc-2} \cdot \max\left\{0, \frac{SOC_{sc} - SOC_{min}}{SOC_{low} - SOC_{min}}\right\} \quad (10)$$

同理,当储能设备的荷电状态满足 $SOC_{bat} > 0.8$, $SOC_{sc} > 0.95$ 时,就无法响应下一时刻的充电请求,从而做出相应的调整。

$$P_{bat-3} = P_{bat-2} \cdot \max\left\{0, \frac{SOC_{max} - SOC_{bat}}{SOC_{max} - SOC_{high}}\right\} \quad (11)$$

$$P_{sc-3} = P_{sc-2} \cdot \max \left\{ 0, \frac{SOC_{max} - SOC_{sc}}{SOC_{max} - SOC_{high}} \right\} \quad (12)$$

2.3.2 协调控制策略

为表示方便,本文采用“+”为储能装置处于放电状态,“-”为处于充电状态,“C”为储能装置的荷电状态处于充电警戒区,“N”为处于正常工作

区,“D”为处于放电警告区。其具体控制方式及结果如表2所示,其中 $|\Delta P| = (|P_{bat}| + |P_{sc}|) / 2$ 。通过调整储能设备各自的功率指令,不仅可以使总补偿功率最大限度地接近 P_{HESS} ,也避免了储能设备过充、过放的问题。

表2 过充、过放保护协调控制结果

Tab.2 The coordination control results of over-charge and over-discharge protection

分组	混合储能所处状态	P_{bat-3} 调整	P_{sc-3} 调整
仅需过放保护控制	$+D_{bat}$, 任意超级电容状态	式(9)	$P_{HESS} - P_{bat-3}$
	$+D_{sc}$, 任意蓄电池状态	$P_{HESS} - P_{sc-3}$	式(10)
仅需过充保护控制	$-C_{bat}$, 任意超级电容状态	式(11)	$P_{HESS} - P_{bat-3}$
	$-C_{sc}$, 任意蓄电池状态	$P_{HESS} - P_{sc-3}$	式(12)
同时进行过充过放保护控制	$+D_{bat}, -C_{sc}$	$P_{bat-3} - \Delta P $	$P_{sc-3} + \Delta P $
	$-C_{bat}, +D_{sc}$	$P_{bat-3} + \Delta P $	$P_{sc-3} - \Delta P $
同时进行过充保护控制或者过放保护控制	$+D_{bat}, +D_{sc}$	式(9)	式(10)
	$-C_{bat}, -C_{sc}$	式(11)	式(12)

2.4 最大充、放电功率协调控制

当如果储能设备的工作功率高于允许的最大限值,则会缩短储能装置的使用寿命,甚至有可能损坏设备,因此需要对工作功率进行调整。

其具体的控制原则为:当一种储能装置的工作功率高于允许的最大限值时,首先按照最大值进行控制,剩余部分再根据储能装置的SOC来决定。最大功率限值协调控制方式如表3所示。

表3 最大功率限值协调控制方式

Tab.3 The coordinated control mode maximum power limit

P_{bat-3} 范围	P_{sc-3} 范围	$P_{bat-ref}$ 调整	P_{sc-ref} 调整
$[P_{dbat-max}, +\infty)$	$[P_{dsc-max}, +\infty)$	$P_{dbat-max}$	$P_{dsc-max}$
	$(-\infty, P_{csc-max}]$	$P_{dbat-max}$	$P_{bat-ref} + P_{sc-ref} - P_{dbat-max}$
	$[P_{csc-max}, P_{dsc-max}]$	$P_{dbat-max}$	$P_{bat-ref} + P_{sc-ref} - P_{dbat-max}$
$(-\infty, P_{cbat-max}]$	$(-\infty, P_{csc-max}]$	$P_{cbat-max}$	$P_{csc-max}$
	$[P_{dsc-max}, +\infty)$	$P_{cbat-max}$	$P_{bat-ref} + P_{sc-ref} - P_{cbat-max}$
	$[P_{csc-max}, P_{dsc-max}]$	$P_{cbat-max}$	$P_{bat-ref} + P_{sc-ref} - P_{cbat-max}$
$[P_{cbat-max}, P_{dbat-max}]$	$[P_{dsc-max}, +\infty)$	$P_{bat-ref} + P_{sc-ref} - P_{dsc-max}$	$P_{dsc-max}$
	$(-\infty, P_{csc-max}]$	$P_{bat-ref} + P_{sc-ref} - P_{csc-max}$	$P_{csc-max}$
	$[P_{csc-max}, P_{dsc-max}]$	$P_{bat-ref}$	P_{sc-ref}

表3中, $P_{cbat-max}, P_{dbat-max}$ 为蓄电池的充电以及放电的最大限值, $P_{csc-max}, P_{dsc-max}$ 为超级电容的充电以及放电的最大限值; $P_{bat-ref}, P_{sc-ref}$ 分别为蓄电池、超级电容的功率指令。

合储能系统的主要参数,其储能设备的SOC通过计算模块来进行实时计算:

3 仿真算例分析

3.1 参数设置

为了对本文所述的控制方法进行分析验证,在Matlab/Simulink仿真软件中搭建与其相对应的模型,来验证所提能量管理策略的有效性。

在仿真中,设定 $t_s = 30, \Delta t = 20$ 。表4为混

$$SOC_{bat}(t) = SOC_{bat}^0 - \frac{\int_0^t P_{bat-ref}(t) dt}{E_{bat-cap}} \quad (13)$$

$$SOC_{sc}(t) = SOC_{sc}^0 - \frac{\int_0^t P_{sc-ref}(t) dt}{E_{sc-cap}} \quad (14)$$

式中: SOC_{bat}^0, SOC_{sc}^0 为2种储能装置的SOC初始值, $P_{bat-ref}(t), P_{sc-ref}(t)$ 为t时刻2种储能装置的功率指令, $E_{bat-cap}, E_{sc-cap}$ 为2种储能装置储存能量的大小。

表4 混合储能系统主要参数

Tab.4 Main parameters of the hybrid energy storage system

系统参数	SOC_{min}	SOC_{low}	SOC_{high}	SOC_{max}	$E/(kW \cdot h^{-1})$	P_{max}/kW
储能设备						
蓄电池	0.2	0.4	0.6	0.8	13.3	± 50
超级电容	0.15	0.3	0.7	0.95	0.55	± 50

3.2 仿真结果分析

仿真中对2种方案进行对比:方案1为传统的控制策略,即采用 t_s 不变的低通滤波。方案2为本文的控制策略。图4为总波动功率 P_{HESS} 的波形。图5为滤波时间常数变化波形,图6为储能系统中2种不同储能装置的功率指令。图7为采用2种方案储能装置的功率指令,图8为混合储能系统功率指令完成仿真图。图9为直流母线电压波形。图10和图11分别为蓄电池和超级电容的SOC曲线。

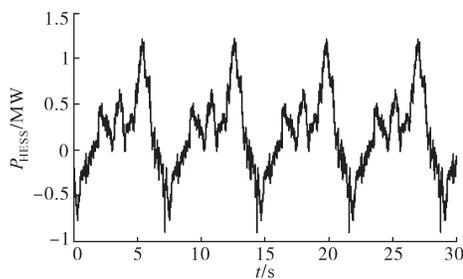


图4 混合储能系统总波动功率

Fig.4 The total fluctuating power of the hybrid energy storage system

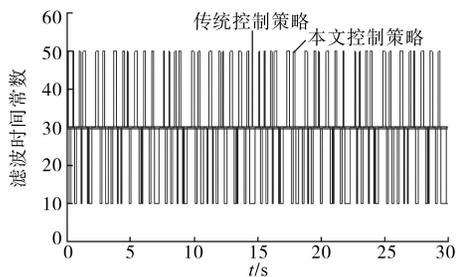


图5 滤波时间常数变化波形

Fig.5 Changes curves of the filter time constant

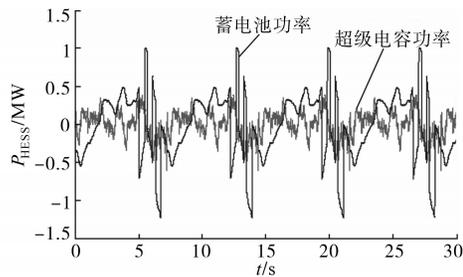
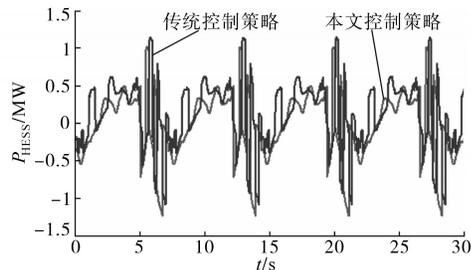
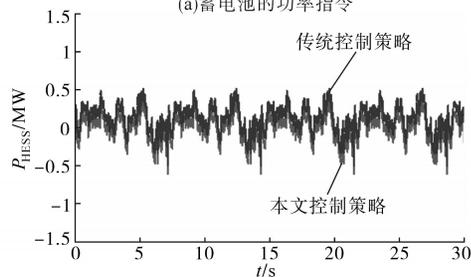


图6 蓄电池和超级电容的功率指令

Fig.6 The power commands of the battery and super-capacitor



(a)蓄电池的功率指令



(b)超级电容的功率指令

图7 2种不同策略下蓄电池和超级电容的功率指令

Fig.7 The power commands of the battery and super-capacitor under two different strategies

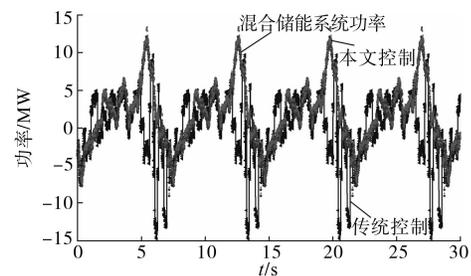


图8 混合储能系统功率指令完成波形

Fig.8 The completion curves of the hybrid energy storage system power commands

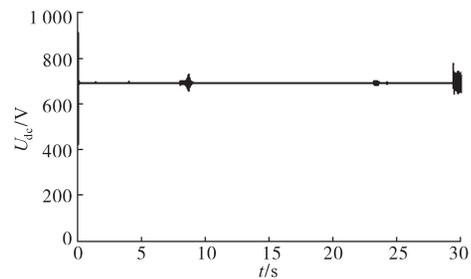


图9 直流母线电压

Fig.9 The DC bus voltage

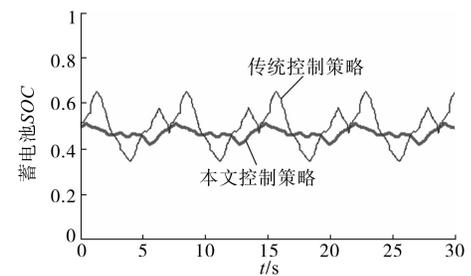


图10 蓄电池的SOC曲线

Fig.10 The SOC curves of the battery

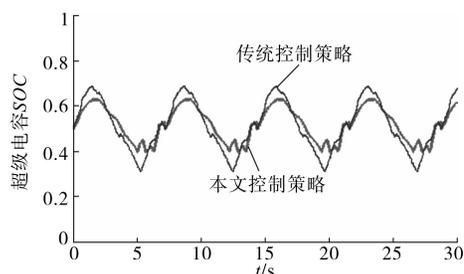


图11 超级电容的SOC曲线

Fig.11 The SOC curves of the super-capacitor

由图5可知,传统控制策略的滤波时间常数恒定,在仿真中没有考虑储能设备的实时状态,使得在补偿不平衡功率 P_{HES} 时有所偏差,而采用本文控制策略根据表1的调整方式来调整 t_s ,结果使得储能设备的储能特性充分发挥,从而使得混合储能功率 P_{HES} 在储能设备间合理分配,最终调整了蓄电池和超级电容的功率指令。由图6可知,超级电容承担了 P_{HES} 的高频部分,蓄电池承担了其低频部分,符合各自的储能特性,通过蓄电池和超级电容的补偿,稳定了直流母线电压。

由图8可知,采用方案2得到的蓄电池和超级电容的功率指令相比方案1得到的功率指令更加接近理想的功率补偿指令,说明了本文所采用控制策略的优越性。从图9的仿真结果可得出,在仿真过程中,母线电压基本维持在690V不变,在运行状态变化时,直流母线电压略有波动,经过混合储能的补偿,迅速地恢复到稳态。根据图10和图11可知,尽管采用方案1和采用方案2储能装置的SOC变化趋势接近,但采用本文控制策略储能系统的SOC基本维持在正常工作区附近,使得储能装置运行在最佳区间,从而延长了储能设备的使用寿命。

4 结论

本文针对石油钻机微电网对储能系统的需求,提出一种混合储能系统功率指令实时调整的协调控制策略,该控制策略依据储能系统的SOC对储能单元的补偿功率不断调整,以逼近理想功率值。仿真结果表明采用本文所提的控制策略使储能装置的性能大大提高,进一步稳定了母线电压,使得石油钻机微电网系统更加稳定,且使

得储能系统的SOC基本维持在正常工作区附近,避免了其过度充电或者过度放电的情况,最终延长了其运行寿命,降低了系统的运行成本。

参考文献

- [1] 董兴华,栾苏,魏培静,等.复合储能控制系统在钻机制动能量回收中的应用[J].石油机械,2016,44(11):38-42.
- [2] 韦统振,吴理心,韩立博,等.基于超级电容器储能的交直交变频驱动系统制动能量综合回收利用方法研究[J].中国电机工程学报,2014,34(24):4076-4083.
- [3] Kalaiselvam. Energy Harvesting Technologies[J]. Sensor Review, 2008, 269(1):991-1001.
- [4] Dougal R A, Liu S, White R E. Power and Life Extension of Battery-ultracapacitor Hybrids[J]. IEEE Transactions on Component Stand Packaging Technologies, 2002, 25(1): 120-130.
- [5] 熊连松,吴斌,卓放,等.太阳能电动车混合储能系统的能量管理策略研究[J].电源学报,2011,9(5):37-43.
- [6] 李成,杨秀,张美霞,等.基于成本分析的超级电容器和蓄电池混合储能优化配置方案[J].电力系统自动化,2013,37(18):20-24.
- [7] 刘世林,文劲宇,孙海顺,等.风电并网中的储能技术研究进展[J].电力系统保护与控制,2013,41(23):145-153.
- [8] 付学谦,陈皓勇,刘国特,等.分布式电源电能质量综合评估方法[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4270-4276.
- [9] Feng X, Gooi H B, Chen S X. Hybrid Energy Storage with Multimode Fuzzy Power Allocator for PV systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 389-397.
- [10] Hredzak B, Agelidis V G. Model Predictive Control of a Hybrid Battery-ultracapacitor Power Source[C]//IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2012:2294-2299.
- [11] Liu C F, Liu J J, Zhang B, et al. Energy Management of Hybrid Energy Storage System (HESS) Based on Sliding Mode Control [C]//IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012, 406-410.
- [12] 张国驹,唐西胜,齐智平.超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J].电力系统自动化,2010,34(12): 85-89.
- [13] 洪海生,江全元,严玉婷.实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J].电力系统自动化,2013,37(1):103-109.
- [14] 张野,郭力,贾宏杰,等.基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J].电力系统自动化,2012,36(16):36-41.

收稿日期:2018-05-18

修改稿日期:2018-10-10