

基于T-S模糊逻辑的混合储能孤岛直流微电网功率分配控制

张伟杰¹,顾吉鹏¹,张有兵¹,杨晓东²,姜伟³,汪斌杰¹

(1. 浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310023;

2. 合肥工业大学 新能源利用与节能安徽省重点实验室,安徽 合肥 230009;

3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院,安徽 合肥 230601)

摘要:在含混合储能的直流微电网中,传统阻容下垂控制无法解决由线路电阻和负荷功率波动导致的系统功率分配失衡问题。为此,提出一种基于Takagi-Sugeno(T-S)模糊逻辑的自适应阻容下垂控制方法以实现混合储能的分频分配。根据蓄电池和超级电容的物理特性,建立单个蓄电池支路输出电压、蓄电池组间输出功率差额和阻性下垂系数之间的T-S模糊逻辑关系,以及单个超级电容支路输出功率及其变化率、超级电容组间功率差额和容性下垂系数之间的T-S模糊逻辑关系,并由此构建基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制器。推导含混合储能的直流微电网中各部分的平均阻抗模型,并采用阻抗比分析法对微电网的小信号稳定性进行研究。MATLAB/Simulink仿真结果表明,基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制可保证在线路电阻和负荷功率波动情况下系统功率的合理分配。

关键词:直流微电网;混合储能;T-S模糊逻辑;功率分配;稳定性分析

中图分类号:TM76

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202312002

0 引言

在直流微电网中,可再生能源出力的随机性和间歇性会导致系统功率波动,影响直流微电网的稳定运行。为了提高直流微电网的电能质量、稳定性和可靠性,储能系统得到广泛应用^[1-2]。超级电容具有功率密度高、动态响应速度快的特点,但其能量密度较低;而蓄电池具有功率密度低、动态响应速度慢的特点,但其能量密度较高^[3]。由具有互补特性的2种储能组合形成的混合储能会兼具高能量密度和高功率密度的特点,且可以延长储能的使用寿命,提高系统的运行效率^[4]。

在混合储能中,不同储能之间的功率分配是一个重要问题,高能量密度的储能需要平衡稳态功率失衡,高功率密度的储能需要补偿瞬态功率。已有功率分配控制策略主要包括集中式控制、分布式控制2种^[5]。集中式控制由中央控制器与分布式单元的通信机制组成,采用的方法包括滤波器分解^[6]、小波分解^[7]等。此类控制方法相对简单,但过度依赖通信设备,会影响系统的可靠性。针对该问题,以下垂控制为主的分布式控制策略被提出。文献[8-9]在以虚拟电阻为主的下垂控制中引入虚拟电容,实现了不同类型储能对系统功率的分频分配。但上

述控制策略中的下垂系数为恒定值,对于未知线路电阻以及负荷突变的情况难以自适应调整,容易造成系统功率分配失衡。文献[10]将模型预测控制器与虚拟电容/电阻下垂控制相结合,提出了基于复合模型预测控制的混合储能功率分配策略,充分发挥了蓄电池和超级电容互补的优势。但是该分配策略未考虑多组储能的情况,无法保障同种类型储能间的功率分配精度。文献[11]引入积分变量对传统下垂控制进行改进,通过调整积分下垂系数实现了高频功率在多储能间的功率分配,提高了储能间的分配精度,但是积分环节易受外界环境因素的影响,降低了系统的抗干扰能力。针对上述策略的不足,本文提出一种基于Takagi-Sugeno(T-S)模糊逻辑的自适应阻容下垂控制策略,以实现系统功率的分频分配,解决由线路电阻和负荷功率波动导致的系统功率分配失衡问题,并考虑多组混合储能间的功率分配。

直流微电网的稳定性分析是保证其安全可靠运行的基础,同时可为微电网的参数设计提供参考^[12]。稳定性分析方法主要包括大信号稳定性分析、小信号稳定性分析。文献[13]基于T-S模糊建模对直流微电网集群进行大信号稳定性分析,同时估计了系统的渐进稳定区域。文献[14]采用混合势函数理论对直流微电网进行了稳定性分析,在考虑恒功率负载和储能动态特性的条件下得到了大信号稳定判据。文献[15]采用广义状态空间法和状态空间平均法建立了变换器的阻抗模型,并基于阻抗比判据判

收稿日期:2023-07-05;修回日期:2023-10-10

在线出版日期:2023-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U22B20116,52007074)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U22B20116,52007074)

断直流微电网的小信号稳定性。文献[16]根据小信号阻抗比稳定性判据,研究了负荷功率、下垂系数等参数变化对直流微电网稳定性的影响。在上述研究中,大信号稳定性分析方法适用于直流微电网中发生重大干扰的情况,小信号稳定性分析方法适用于直流微电网在稳态工作点运行时受到小干扰的情况。本文所研究的线路电阻和负荷波动均属于小干扰情况,因此选用小信号稳定性分析方法对其进行分析。

为了解决上述问题,本文提出一种基于T-S模糊逻辑的自适应阻容下垂控制策略,用于混合储能间功率的分频分配,有效解决了集中式控制中通信延迟、单点故障的问题,减轻了线路电阻对功率分配的影响,提高了系统的动态性能和稳定性。然后,基于各部件的平均模型,通过相关计算得到系统的阻抗比,并根据奈奎斯特判据对系统的小信号稳定性进行分析。通过MATLAB/Simulink对混合储能在不同工况下的运行状态进行仿真,验证所提控制策略的有效性与合理性。

1 混合储能直流微电网的系统结构

目前,直流电源和直流负载应用愈加广泛,孤岛直流微电网的应用将愈加广泛^[17]。储能系统是保证孤岛微电网稳定运行的关键,因此本文着重分析孤岛运行模式下混合储能直流微电网的稳定运行控制策略。混合储能直流微电网的结构示意图如图1所示。该直流微电网主要由2组混合储能(含蓄电池、超级电容)、直流电机、阻性负载、各类变换器及其控制电路组成。混合储能中的蓄电池和超级电容通过双向DC/DC变换器并入直流母线。直流电机和阻性负载是直流微电网中的耗能元件,其中直流电机

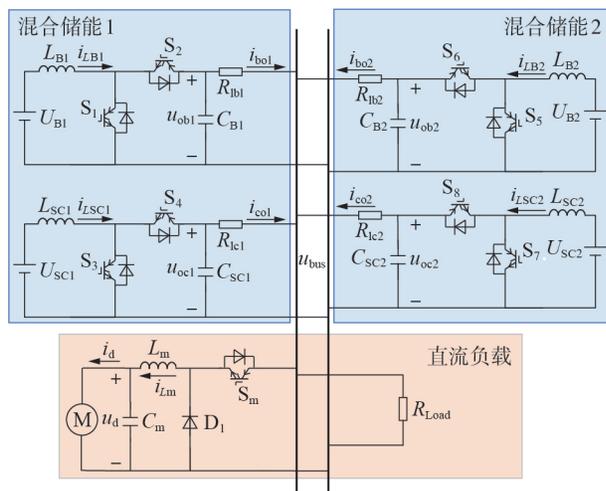


图1 混合储能直流微电网的结构示意图
Fig.1 Structure diagram of DC microgrid with hybrid energy storage

通过Buck变换器与直流母线连接,阻性负载直接接入直流母线。

图1中: U_{Bi} 、 U_{SCi} ($i=1,2$)分别为混合储能*i*中蓄电池、超级电容的输出电压; L_{Bi} 、 C_{Bi} 、 R_{Bi} 分别为混合储能*i*中蓄电池支路的滤波电感、滤波电容、线路电阻; L_{SCi} 、 C_{SCi} 、 R_{SCi} 分别为混合储能*i*中超级电容支路的滤波电感、滤波电容、线路电阻; L_m 、 C_m 分别为直流电机支路的电感、电容; u_{bus} 为直流母线电压; u_{obi} 、 i_{boi} 、 i_{LBi} 分别为混合储能*i*中蓄电池支路的输出电压、输出电流、电感电流; u_{oci} 、 i_{coi} 、 i_{LSCi} 分别为混合储能*i*中超级电容支路的输出电压、输出电流、电感电流; u_d 、 i_{Lm} 、 i_d 分别为直流电机的输出电压、电感电流、输出电流; R_{Load} 为直流负载电阻。

混合储能是直流微电网中重要的功率支撑部件,可有效平抑风光出力。通过对混合储能的合理控制,可实现微电网内部功率的合理分配,维持母线电压稳定和系统安全运行。因模糊逻辑控制具有较强的容错能力和抗干扰性,且对被控对象的数学模型的精度要求不高,能较好地满足混合储能的控制要求,为此本文着重研究直流微电网中混合储能功率分配的模糊控制策略。

2 基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制

2.1 阻容下垂控制

阻容下垂控制是实现混合储能功率分频分配(即蓄电池提供稳态能量,超级电容提供暂态分量)的主要方法之一。以单组混合储能(混合储能1)为例,其对应的戴维南等效电路如图2所示。图中: V_{ref} 为直流母线电压参考值; V_{o1} 、 i_{o1} 分别为蓄电池支路的输出电压、输出电流; V_{o2} 、 i_{o2} 分别为超级电容支路的输出电压、输出电流; R_{b1} 为阻性下垂系数; C_{c1} 为虚拟电容值, $1/C_{c1}$ 为容性下垂系数; R_{11} 、 R_{12} 为线路电阻; i_o 为混合储能的输出电流。

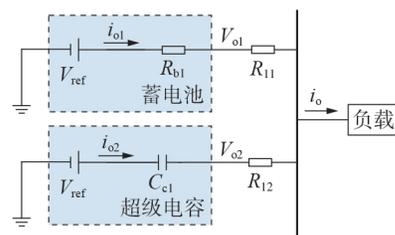


图2 混合储能阻容下垂控制的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of resistance-capacitance droop control for hybrid energy storage

在直流微电网中,当线路电阻小于下垂系数较多时,可以忽略线路电阻 R_{11} 、 R_{12} 的影响进行相关研究^[18]。在这种情况下,由图2可得到阻容下垂控制的表达式为:

$$\begin{cases} V_{o1} = V_{ref} - R_{b1} i_{o1} \\ V_{o2} = V_{ref} - \frac{1}{sC_{c1}} i_{o2} \end{cases} \quad (1)$$

由基尔霍夫电流定律可得混合储能的输出电流 i_o 为:

$$i_o = i_{o1} + i_{o2} \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)可得蓄电池和超级电容各自支路的输出电流,如式(3)所示。

$$\begin{cases} i_{o1} = G_L(s) i_o = \frac{1}{sR_{b1}C_{c1} + 1} i_o \\ i_{o2} = G_H(s) i_o = \frac{sR_{b1}C_{c1}}{sR_{b1}C_{c1} + 1} i_o \end{cases} \quad (3)$$

式中: $G_L(s)$ 、 $G_H(s)$ 分别为低通滤波器、高通滤波器的传递函数。基于低通滤波器、高通滤波器,负载电流的低频、高频部分被分别分配给蓄电池和超级电容。由式(3)可得蓄电池和超级电容支路输出电流在时域上的阶跃响应,如附录A图A1所示。由图可知:蓄电池支路的输出电流 i_{o1} 逐渐增加,在稳态时达到总输出电流 i_o ,即响应全部功率;超级电容支路的输出电流 i_{o2} 快速响应,且取值逐渐减小,在稳态时值为0。

频域下混合储能中各部分和整体的输出阻抗如式(4)所示。与之对应的频率响应曲线如附录A图A2所示,图中的转折角频率 ω_c 由式(5)确定。

$$\begin{cases} Z_{o1} = R_{b1} \\ Z_{o2} = \frac{1}{sC_{c1}} \\ Z_o = \frac{R_{b1}}{R_{b1}C_{c1}s + 1} \\ \omega_c = \frac{1}{R_{b1}C_{c1}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\omega_c = \frac{1}{R_{b1}C_{c1}} \quad (5)$$

式中: Z_{o1} 、 Z_{o2} 分别为蓄电池、超级电容支路的输出阻抗; Z_o 为混合储能的输出阻抗。

由图A2可知, Z_{o1} 、 Z_{o2} 在角频率 ω_c 处相交, Z_o 由 ω_c 之前的虚拟电阻和 ω_c 之后的虚拟电容共同控制,这与式(3)的含义是一致的。由此,在控制混合储能时需选取合适的转折角频率,使低频段、高频段分别由阻性下垂系数和容性下垂系数决定,这样才能实现不同储能间物理特性的合理使用,并延长其使用寿命。

当考虑线路电阻 R_{l1} 、 R_{l2} 的影响时,混合储能的电流分配如下:

$$\begin{cases} i_{o1} = G'_L(s) i_o = \frac{sR_{l2}C_{c1} + 1}{s(R_{b1} + R_{l1} + R_{l2})C_{c1} + 1} i_o \\ i_{o2} = G'_H(s) i_o = \frac{s(R_{b1} + R_{l2})C_{c1}}{s(R_{b1} + R_{l1} + R_{l2})C_{c1} + 1} i_o \end{cases} \quad (6)$$

式中: $G'_L(s)$ 、 $G'_H(s)$ 为滤波器的传递函数。由式(6)可知,超级电容仍然补偿高频功率,但线路电阻 R_{l2}

的存在使得蓄电池也获得了部分高频功率,可见线路电阻的存在会影响混合储能的功率分配效果。为了更好地观察这一状况,绘制 R_{l1} 、 R_{l2} 不同取值下蓄电池和超级电容支路输出电流在时域上的阶跃响应,如附录A图A3所示。

由图A3可知,当 $R_{l1} < R_{l2}$ 时,蓄电池支路的输出电流获得了更多的高频分量,这与式(6)所得结论是一致的,所以线路电阻会使得微电网的功率分配精度降低甚至失衡,进而影响其稳定运行。

由式(6)可得蓄电池组与超级电容组之间的功率分配为:

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{\frac{1}{sC_{c1}} + R_{l2}}{R_{b1} + R_{l1}} \quad (7)$$

由式(7)可知,蓄电池与超级电容之间将会以下垂系数叠加线路电阻后的等效下垂系数进行反比分配。同理,可得蓄电池组间、超级电容组间的功率分配分别为:

$$\frac{i_{bo1}}{i_{bo2}} = \frac{R_{lb2} + R_{lb2}}{R_{b1} + R_{lb1}} \quad (8)$$

$$\frac{i_{co1}}{i_{co2}} = \frac{\frac{1}{sC_{c2}} + R_{lc2}}{\frac{1}{sC_{c1}} + R_{lc1}} \quad (9)$$

式中: R_{lb2} 为混合储能2中蓄电池支路的阻性下垂系数; $1/C_{c2}$ 为混合储能2中超级电容支路的容性下垂系数。

由式(8)和式(9)可知,蓄电池组和超级电容组也以其各自下垂系数叠加线路电阻后的等效下垂系数进行反比分配。假设初始阻性、容性下垂系数为定值,当增大 R_{l1} 、 R_{l2} 之间的差值时,储能之间(蓄电池组间、超级电容组间、混合储能组间)的功率差值也会增大,功率分配精度将会下降。另外,实际电路中的线路电阻是未知的,这使得阻容下垂系数是难以确定的,且在负载变化时阻容下垂系数不能自动调整,而模糊逻辑的引入恰好可以解决上述问题。

2.2 阻容下垂系数的范围

阻性下垂系数 R_{bi} ($i=1, 2$) 的取值与直流微电网的电压偏差要求相关, R_{bi} 需满足:

$$R_{bi} \leq \left| \frac{\Delta V_{max}}{I_{i,max}} \right| \quad (10)$$

式中: ΔV_{max} 为允许的直流母线电压的最大变化量,一般为直流母线额定电压的5%; $I_{i,max}$ 为混合储能 i 中蓄电池支路的最大输出电流。

由式(5)可知,时间常数 $\tau = R_{bi}C_{ci}$ 。设置超级电容的功率响应时间 $t_c = 0.1$ s,并选择系统响应达到稳态值的95%的调节时间 $t_s = 3\tau$,超级电容的响应时间 t_c 应小于调节时间 t_s 。根据上述分析,可得容性下垂系数需要满足:

$$\frac{1}{C_{ci}} \leq \frac{3R_{bi}}{t_c} \quad (11)$$

由式(10)可得阻性下垂系数 $R_{bi} \in [0, 0.4]$, 由式(11)可得容性下垂系数 $1/C_{ci} \in [0, 12]$ 。

传统阻容下垂控制的分配特性会受到线路电阻、负载变化等因素的影响,且这些因素往往是未知的,这会导致对应的下垂系数难以选取且自适应调整,因而不能保证混合储能间的功率分配精度。

T-S模糊控制更适用于“分段线性系统”的控制,便于进行数学上的定量分析,且设计较为简单^[19]。若将T-S模糊逻辑用于传统阻容下垂控制中重要参数(阻性、容性下垂系数)的确定,则可有效实现用户期望特性与重要参数间的分段线性调整,进而保证混合储能在计及线路电阻和负载波动时仍能实现较高精度的功率分频分配效果。

T-S模糊推理的输出是数值或者是关于输入量的函数,除用于常规模糊控制器的设计外,还可以用于逼近任意非线性系统,有广泛的应用场景。T-S模糊推理系统中常用的有0阶和1阶模糊推理。

针对一个多输入单输出系统,其0阶T-S模糊推理中的第 j 条模糊规则 R^j 为: if x_1 is A_1^j, x_2 is A_2^j, \dots, x_k is A_k^j , then $u_j = c_j$ 。其中: $j=1, 2, \dots, n$, n 为模糊规则总数; x_1, x_2, \dots, x_k 为输入; u_j 为第 j 条模糊规则的输出; $A_1^j, A_2^j, \dots, A_k^j$ 为第 j 条模糊规则的隶属度函数; c_j 为常数。

当某一输入 x_j 触发 m 条模糊规则时,根据 m 个输出 u_j 可计算得到系统的总输出 U 。采用加权平均法计算式 U 的表达式为:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^m A(u_j)u_j}{\sum_{j=1}^m A(u_j)} = \frac{A(u_1)u_1 + A(u_2)u_2 + \dots + A(u_m)u_m}{A(u_1) + A(u_2) + \dots + A(u_m)} \quad (12)$$

式中: $A(u_j)$ 为 u_j 的隶属度。

1阶甚至更高阶的T-S模糊推理系统的设计较为复杂,很少被用于实际生活中。故本文采用0阶T-S模糊推理系统进行相关设计。

2.3 蓄电池的模糊下垂控制

本文设计的混合储能直流微电网的整体控制方案如图3所示。图中:PMW表示脉宽调制信号; $G_i(s), G_v(s)$ 分别为电流环、电压环的传递函数。混合储能的控制由基于0阶T-S模糊逻辑的阻容下垂控制实现,直流电机的控制由电压电流双闭环控制实现,可变直流负载直接接入直流母线消耗电能。该控制方案具有如下优点:①将传感器收集的各储能单元的功率信息传送至控制中心,经简单计算后直接下发至模糊控制器的输入侧,不需要额外的互联通信线路,因而具有较快的响应速度;②由于基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制器的引入,在外界条件

变化时可自适应地改变阻容下垂系数,具有较好的抗干扰性,系统的可靠性得以保证。

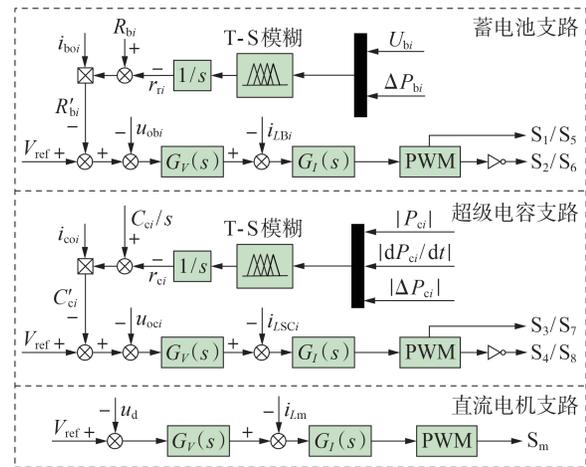


图3 系统控制方案

Fig.3 Control scheme of system

隶属度函数设计会影响模糊控制器的性能。陡峭的隶属度函数会提高控制的灵敏度,使控制器具有较高的分辨率;平缓的隶属度函数会降低控制的灵敏度,使控制器具有较好的抗干扰性。在实际应用中,当远离系统状态平衡点或偏差较大时,可采用低灵敏度隶属度函数;当接近系统状态平衡点或偏差较小时,可采用高灵敏度隶属度函数^[20]。

蓄电池支路的模糊下垂控制如图3中蓄电池支路部分所示。为了维持低频母线电压稳定,提高蓄电池组间的功率分配精度,设计模糊控制器有2个输入量,分别为蓄电池支路的端口电压 U_{bi} 和相邻支路的功率差额 ΔP_{bi} , 输出量为阻性下垂系数的补偿量 r_{ri} 。

蓄电池相邻支路的功率差额 ΔP_{bi} 、调整后的阻性下垂系数 R'_{bi} 分别为:

$$\begin{cases} \Delta P_{bi} = P_{bi} - \bar{P}_b \\ \bar{P}_b = \frac{P_{b1} + P_{b2}}{2} \end{cases} \quad (13)$$

$$R'_{bi} = R_{bi} - r_{ri}/s \quad (14)$$

式中: P_{bi} 为混合储能 i 中蓄电池的功率; \bar{P}_b 为2组混合储能中蓄电池的功率平均值。 ΔP_{bi} 的获取无须经过任何通信装置,仅是经过简单计算即可得到^[1]。

设定输入量、输出量的取值范围分别为 $U_{bi} \in [380, 420]$ V、 $\Delta P_{bi} \in [-5, 5]$ kW、 $r_{ri} \in [-0.1, 0.1]$ 。 U_{bi} 的模糊集合 $f_{U_{bi}}$ 和 ΔP_{bi} 的模糊集合 $f_{\Delta P_{bi}}$ 均含7个模糊变量,即 $f_{U_{bi}} = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7\}$, $\Delta P_{bi} = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7\}$ 。为了使蓄电池端口电压 U_{bi} 稳定在参考值附近,其隶属度函数应在参考值400V处分布较为密集,蓄电池相邻支路的功率差额 ΔP_{bi} 的隶属函数采用均匀分布的三角隶属函数,2个输入变量的隶属函数如附录A图A4所示。为了提

高阻性下垂系数的分辨率,输出量 r_{ci} 的取值应在最优值附近分布较为密集,则其对应的模糊子集质心为 $\{-0.1, -0.05, -0.02, 0, 0.02, 0.05, 0.1\}$ 。

若蓄电池相邻支路的功率差额正向增大或蓄电池端口电压正向增加,则需要增大阻性下垂系数以维持母线电压稳定和平衡蓄电池组间功率分配,此时根据式(14)应减小阻性下垂系数的补偿量;否则,应减小阻性下垂系数,增大阻性下垂系数的补偿量。由此可得到蓄电池模糊下垂控制的模糊规则,如附录A表A1所示,对应的模糊控制器的曲面图如附录A图A5所示。

2.4 超级电容的模糊下垂控制

超级电容支路的模糊下垂控制如图3中超级电容支路部分所示。为了保证超级电容快速响应高频功率,提高超级电容组间的功率分配精度,设计模糊控制器有3个输入量,分别为超级电容支路的输出功率绝对值 $|P_{ci}|$ 、输出功率变化率绝对值 $|dP_{ci}/dt|$ 和相邻支路间的功率差额绝对值 $|\Delta P_{ci}|$,引入绝对值的目的是简化输入、输出变量之间的模糊逻辑关系,减少模糊规则的设计数量。输出量为容性下垂系数的补偿量 r_{ci} 。相邻支路间的功率差额绝对值 $|\Delta P_{ci}|$ 、调整后的虚拟电容值 C'_{ci} 分别为:

$$\begin{cases} |\Delta P_{ci}| = |P_{ci} - \bar{P}_c| \\ \bar{P}_c = \frac{P_{c1} + P_{c2}}{2} \end{cases} \quad (15)$$

$$C'_{ci} = \frac{C_{ci}}{s} - \frac{r_{ci}}{s} \quad (16)$$

式中: P_{ci} 为混合储能 i 中超级电容的功率; \bar{P}_c 为2组混合储能中超级电容的功率平均值。

设定输入量、输出量的取值范围分别为 $|P_{ci}| \in [0, 5] \text{ kW}$ 、 $|dP_{ci}/dt| \in [1, 3]$ 、 $|\Delta P_{ci}| \in [0, 5] \text{ kW}$ 、 $r_{ci} \in [0, 8]$ 。 $|P_{ci}|$ 的模糊集合 $f_{|P_{ci}|}$ 含有5个模糊变量,即 $f_{|P_{ci}|} = \{P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5\}$; $|dP_{ci}/dt|$ 的模糊集合 $f_{|dP_{ci}/dt|}$ 含有7个模糊变量,即 $f_{|dP_{ci}/dt|} = \{P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5, P'_6, P'_7\}$; $|\Delta P_{ci}|$ 的模糊集合 $f_{|\Delta P_{ci}|}$ 含有3个模糊变量,即 $f_{|\Delta P_{ci}|} = \{P'_1, P'_2, P'_3\}$ 。3个输入变量的隶属函数选取均匀分布的三角隶属度函数,其隶属函数如附录A图A6所示。为了提高容性下垂系数的分辨率,输出量 r_{ci} 的取值同样应在最优值附近分布较为密集,则其对应的模糊子集质心为 $\{0.01, 0.5, 1, 2, 3.5, 5.5, 8\}$ 。

超级电容支路的线路电阻对高频功率的分配影响较大,线路电阻越大,蓄电池支路分担的高频功率越多,因此需要减小容性下垂系数,即超级电容支路的输出功率越小,功率变化率越小,功率差额越大,则容性下垂系数的补偿量越大。由此可得到超级电容模糊下垂控制的模糊规则,如附录A表A2所示,

对应的模糊控制器的曲面图如附录A图A7。

3 直流微电网的稳定性分析

3.1 各部件的阻抗模型

混合储能 i 中蓄电池支路上DC/DC变换器的结构如图1所示,根据变换器的工作原理可得到:

$$\begin{cases} u_{L_{Bi}} = U_{Bi} - D_2 u_{bus} - D_2 i_{boi} R_{l_{bi}} \\ i_{C_{Bi}} = D_2 i_{L_{Bi}} - i_{boi} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $u_{L_{Bi}}$ 、 $i_{C_{Bi}}$ 分别为开关周期内混合储能 i 中蓄电池支路上电感电压、电容电流的平均值; D_2 为蓄电池变换器的平均占空比。

蓄电池支路的电感电压、电容电流在频域上的表达式为:

$$\begin{cases} u_{L_{Bi}} = s L_{Bi} i_{L_{Bi}} \\ i_{C_{Bi}} = s C_{Bi} u_{C_{Bi}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $u_{C_{Bi}}$ 为开关周期内混合储能 i 中蓄电池支路上电容电压的平均值。

联立式(17)和式(18),可得频域上1个开关周期内蓄电池支路上电感电流、电容电压的平均值,如式(19)所示。

$$\begin{cases} i_{L_{Bi}} = \frac{U_{Bi} - D_2 u_{bus} - D_2 i_{boi} R_{l_{bi}}}{s L_{Bi}} \\ u_{C_{Bi}} = u_{bus} + i_{boi} R_{l_{bi}} = \frac{D_2 i_{L_{Bi}} - i_{boi}}{s C_{Bi}} \end{cases} \quad (19)$$

蓄电池双向DC/DC变换器的电流环控制框图如图4(a)所示,对应的阻性下垂控制框图如图4(b)所示。图中: $G_{II}(s)$ 为图4(a)的闭环传递函数; d_2 为蓄电池双向DC/DC变换器的占空比; i_{Lref} 为蓄电池支路上电感电流的参考值。根据图4,由梅逊公式可推导得到蓄电池支路的输出阻抗,如附录A式(A1)所示。

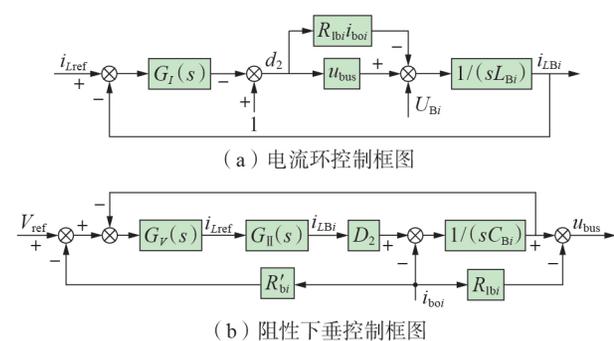


图4 蓄电池双向DC/DC变换器的控制框图
Fig.4 Control block diagram of battery bidirectional DC/DC converter

同理,可得到混合储能 i 中超级电容支路的输出阻抗,如附录A式(A2)所示。

直流电机支路上的Buck变换器的结构如图1所示,根据变换器的工作原理可以得到:

$$u_{L_m} = D_m u_{bus} - u_d, \quad i_{C_m} = i_{L_m} - i_d \quad (20)$$

式中： u_{Lm} 、 i_{Cm} 分别为开关周期内直流电机支路上电感电压、电容电流的平均值； D_m 为Buck变换器的平均占空比。

直流电机支路上电感电压、电容电流在频域上的表达式为：

$$u_{Lm} = sL_m i_{Lm}, \quad i_{Cm} = sC_m u_{Cm} \quad (21)$$

式中： u_{Cm} 为开关周期内直流电机支路上电容电压的平均值。

联立式(20)和式(21),可得频域上1个开关周期内直流电机支路上电感电流、电容电压的平均值为：

$$\begin{cases} i_{Lm} = \frac{D_m u_{bus} - u_d}{sL_m} \\ u_{Cm} = u_d = \frac{i_{Lm} - i_d}{sC_m} \end{cases} \quad (22)$$

Buck变换器采用双闭环控制,结合式(22)可得直流电机Buck变换器的控制框图,如图5所示。根据图5,由梅逊公式可推导得到直流电机支路的输出阻抗,如附录A式(A3)所示。

3.2 直流微电网系统的阻抗模型

阻抗比分析法是微电网稳定性分析的常用方法之一,其原理如下:首先,根据各部件的功能将微电网划分为若干个子系统,并将每个子系统视为一个双端网络出力;然后,基于戴维南定理将双端网络等效为电阻器串联的电压源,并进一步简化电路;最后,根据奈奎斯特定理判断系统的稳定性。

直流微电网一般由电源侧和负载侧两部分组成,对于图1所示的混合储能直流微电网架构,直流电机和阻性负载被视为负载侧,蓄电池和超级电容因提供电能而被视为电源侧。当该直流微电网含有其他提供电能的元件(如光伏、风机、柴油发电机等),且提供的电能大于消耗的电能时,蓄电池和超级电容在容量限制范围内才会充电。

就图1所示直流微电网而言,仅能研究蓄电池和超级电容的放电状态,直流微电网的等效电路图如附录A图A8所示。考虑蓄电池和超级电容充电状态的稳定性分析详见附录B。

由图A8可得混合储能直流微电网的输入阻抗 $Z_i(s)$ 、输出阻抗 $Z_o(s)$ 分别为：

$$\begin{cases} Z_i(s) = \frac{Z_R Z_{om}}{Z_R + Z_{om}} \\ Z_o(s) = \frac{Z_{ob1} Z_{oc1}}{Z_{ob1} + Z_{oc1}} // \frac{Z_{ob2} Z_{oc2}}{Z_{ob2} + Z_{oc2}} \end{cases} \quad (23)$$

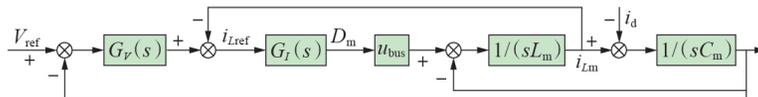


图5 直流电机Buck变换器的控制框图

Fig.5 Control block diagram of Buck converter for DC motor

式中： Z_{obi} 为混合储能*i*中蓄电池支路的等效阻抗； Z_{oci} 为混合储能*i*中超级电容支路的等效阻抗； Z_R 、 Z_{om} 分别为阻性负载、直流电机的等效阻抗。

建立直流微电网的小扰动简化等效模型,如图6所示。图中： $\hat{u}_{ms}(s)$ 为电源侧输出电压的小信号扰动量； $\hat{u}_{bus}(s)$ 为直流母线电压的扰动量。

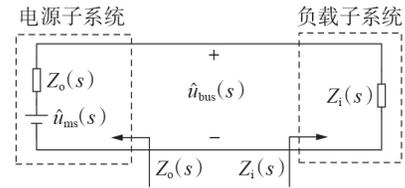


图6 直流微电网的小扰动简化等效模型

Fig.6 Simplified equivalent model of small disturbance for DC microgrid

根据图6可得电源侧输出电压小信号扰动量与直流母线电压之间的关系,如式(24)所示。

$$\frac{\hat{u}_{bus}(s)}{\hat{u}_{ms}(s)} = \frac{1}{1 + Z_o(s)/Z_i(s)} \quad (24)$$

式中： $Z_o(s)/Z_i(s)$ 为系统的阻抗比。

由式(24)可以看出,直流母线电压的大小与系统的阻抗比有关。由奈奎斯特判据可知,当系统阻抗比的奈奎斯特曲线不包围点(-1,0)时,直流微电网是稳定运行的。式(24)为高阶传递函数,因此直流母线电压的响应曲线易存在超调。

3.3 下垂系数对系统稳定性的影响

只有在各部件稳定的基础上研究直流微电网系统的稳定性才更有意义^[21]。根据式(A1)和式(A2)可绘制各部件的奈奎斯特曲线。蓄电池单元在阻性下垂系数 R'_i 变化时的奈奎斯特曲线如图7(a)所示,超级电容在容性下垂系数 $1/C'_i$ 变化时的奈奎斯特曲线如图7(b)所示。

由图7(a)可看出,蓄电池单元的所有奈奎斯特曲线均不包围点(-1,0),且随着阻性下垂系数的增大,奈奎斯特曲线所包含的范围逐渐缩小,即稳定裕度逐渐增大,这说明阻性下垂系数在其变化范围内数值越大,蓄电池支路的稳定性越好。由图7(b)可看出,超级电容单元的所有奈奎斯特曲线也不包围点(-1,0),所以超级电容单元在容性下垂系数变换范围内也是稳定的,且随着容性下垂系数的增大,超级电容支路的稳定性越好。

根据式(23)可绘制直流微电网系统阻抗比的奈奎斯特曲线,如图8所示。由图可知,随着阻性、容

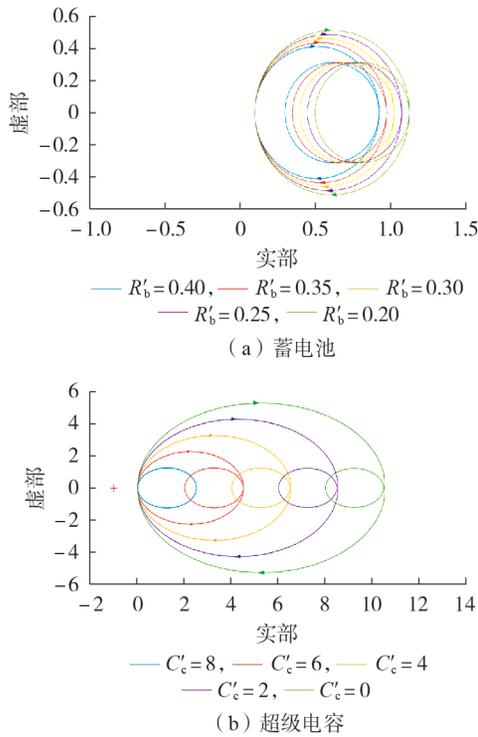


图 7 下垂系数变化时蓄电池、超级电容的奈奎斯特曲线
Fig.7 Nyquist curves of battery and supercapacitor with variation of sag coefficients

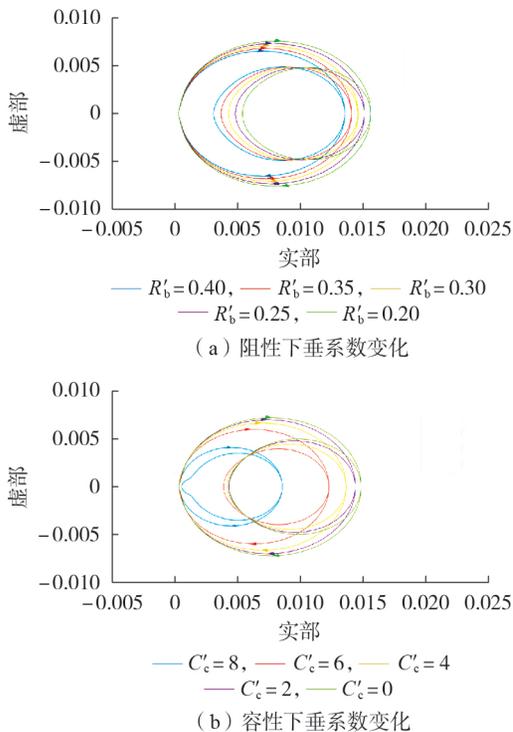


图 8 下垂系数变化时直流微电网阻抗比的奈奎斯特曲线
Fig.8 Nyquist curves of DC microgrid impedance ratio with variation of sag coefficients

性下垂系数的增大,直流微电网系统的奈奎斯特曲线逐渐向左移动,且曲线包含的范围逐渐减小,即系统的稳定裕度逐渐增大,这说明当阻性、容性下垂系

数在合理的范围内变化时,直流微电网是稳定运行的。

4 仿真分析

4.1 系统参数设置

蓄电池的容量会影响微电网稳态时的能量供给,超级电容的容量会影响微电网暂态时的能量供给,因此需要选择合适的容量配比,这样才能保证微电网的高效运行,延长各部件的寿命。为了保证经济性,参考文献[22-23]设置蓄电池、超级电容的容量配比为 4:1,在本文的研究中该配比亦可改变。

本文选用直流电机作为典型负载,直流电机需经过一段缓慢变化的启动过程才能稳定运行,该过程被视为暂态变化过程。为了验证基于 T-S 模糊逻辑的阻容下垂控制的功率分频分配效果以及在暂态变化过程中的有效性,设计了混合储能直流微电网的 3 种工况进行对比分析。

在 MATLAB / Simulink 仿真平台中搭建图 1 所示的微电网系统,系统参数如附录 C 表 C1 所示。3 种工况下的负荷功率波动设置如下:在 $[0, 2)$ s 期间,阻性负载不接入,仅有直流电机;在 2 s 时,接入 8 kW 的阻性负载;维持运行 3 s 后,在 5 s 时切断阻性负载;继续运行直至 7 s 结束。整个过程由蓄电池、超级电容为直流电机和阻性负载供电。

4.2 工况 1:无线路电阻

工况 1 为 2 组混合储能均无线路电阻,仿真结果如附录 C 图 C1 所示。由图可知:蓄电池在阻性下垂系数的作用下响应低频功率,在 2 s 时增加负载后,蓄电池缓慢放电,在达到稳态后响应全部功率;超级电容在容性下垂系数的作用下响应高频功率,在 2 s 时超级电容快速补偿功率波动,且响应功率随着时间的增长逐渐降低,在稳态时减小至 0;在 5 s 时切断负载,蓄电池和超级电容器仍为直流电机供电,并对系统功率分频响应。由于无线路电阻,同种类型储能间的功率分配结果相同,响应曲线一致。同时可观察到:在突增和切断负载时母线电压仅有微小的波动,基本稳定在 400 V;直流电机在整个仿真过程中稳定运行,电机转速保持在 1200 r/min。

4.3 工况 2:线路电阻差值较小

工况 2 为 2 组混合储能有线路电阻,且设定蓄电池单元的线路电阻 $R_{lb1}=0.1 \Omega$ 、 $R_{lb2}=0.03 \Omega$,超级电容单元的线路电阻 $R_{lc1}=0.03 \Omega$ 、 $R_{lc2}=0.12 \Omega$ 。将传统阻容下垂控制与本文所提基于 T-S 模糊逻辑的阻容下垂控制进行对比,仿真结果见图 9,图中虚线曲线为传统阻容下垂控制的结果,实线曲线为本文所提基于 T-S 模糊逻辑的阻容下垂控制的结果。

观察图 9 可知,2 组蓄电池支路的功率响应在

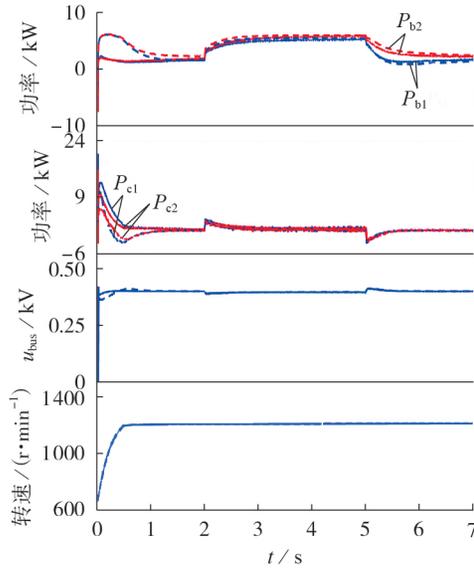


图9 工况2的仿真结果

Fig.9 Simulative results of Working Condition 2

5.5 s时功率差值最大。相较于传统阻容下垂控制,基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制下蓄电池组的功率响应曲线重合度更高,蓄电池组间的均流效果明显得到提升,功率分配精度显著提高。在传统阻容下垂控制下:直流母线电压在0.58 s时出现了2.94%的超调量,恢复稳定时长为0.67 s;2 s时增加负载后,直流母线电压跌落超调量为2.03%,并且在0.8 s后稳定在参考值附近;在5 s切断负载时,直流母线电压存在2.93%的超调量,并且在5.88 s时稳定在400 V。基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制下:直流母线电压在0.35 s时稳定在参考值附近;2 s时增加负载后,直流母线电压跌落超调量为1.22%,并在0.5 s后稳定在参考值附近;在5 s切断负载时,直流母线电压存在2.42%的超调量,并在5.56 s时稳定在400 V。上述对比结果表明基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制的抗干扰能力更好。

由于电机的存在,其启动过程对系统初始状态的影响较大。由图9(a)可看出,在传统阻容下垂控制下,蓄电池支路的功率响应在1.33 s时趋于稳定状态,超级电容支路的功率响应在1.4 s时趋于稳定;由图9(b)可看出,在基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制下,蓄电池支路的功率响应经过0.56 s趋于稳定,超级电容支路的功率响应经过0.7 s后处于稳定状态。通过对比分析可知,采用本文所提方法时混合储能在电机启动过程中的调节时间更短,且平滑了混合储能的功率响应曲线。直流电机在仿真过程中基本稳定,这表明在线路电阻不为0的情况下,基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制具有较好的控制效果。

4.4 工况3:线路电阻差值较大

工况3增大储能间的线路电阻差值,设定蓄电池单元的线路电阻 $R_{lb1}=0.03\ \Omega$ 、 $R_{lb2}=0.12\ \Omega$,超级电容单元的线路电阻 $R_{lc1}=0.15\ \Omega$ 、 $R_{lc2}=0.04\ \Omega$ 。对比传统阻容下垂控制、本文所提基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制的仿真结果,如附录C图C2所示。

由图C2可看出,在储能间线路电阻的差值变大时,相较于传统阻容下垂控制,基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制在负载突变的情况下对功率的分频分配效果更加显著,分配精度的提升效果更加明显。基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制能在保持母线电压稳定、直流电机平稳运行的基础上,提高蓄电池单元的均流精度,使得超级电容单元的响应速度更快。

综合图C1、图9、图C2可以看出,基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制的功率分频分配效果优于传统阻容下垂控制。2种控制方法的功率分频分配效果不明显,主要是因为线路电阻差值的影响。在仿真验证中,随着线路电阻差值由0增大到0.07 Ω 再到0.09 Ω ,基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制的控制效果越好,说明基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制可依据线路电阻的变化自适应调整下垂系数,这一性能在负载变化时同样是有用的。当线路电阻差异和负载功率波动更大时,2种控制方法的功率分频分配效果会更加明显。

5 结论

针对混合储能直流微电网在线路电阻和负载功率波动情况下的功率分配失衡问题,本文提出了基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制方法,并对系统的小信号稳定性进行了分析。通过仿真可得以下结论:①在传统阻容下垂控制的基础上引入T-S模糊逻辑控制环节,实现了阻容下垂系数的动态调整,减轻了线路电阻带来的影响;②与传统阻容下垂控制相比,基于T-S模糊逻辑的阻容下垂控制加快了混合储能的动态响应速度,提高了功率分配精度,同时维持了直流母线电压的稳定;③基于阻抗比的奈奎斯特判据有效证明了直流微电网系统是稳定运行的,说明本文所提方法是合理可行的。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] OLIVEIRA T R, GONCALVES SILVA W W A, DONOSO-GARCIA P F. Distributed secondary level control for energy storage management in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2597-2607.
- [2] 付媛, 刘承帅, 王耀铎, 等. 直流微电网的储-荷虚拟直流电机优化控制技术[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 23-29.
FU Yuan, LIU Chengshuai, WANG Yaoduo, et al. Optimal control technology of storage load virtual DC machine in DC

- microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4):23-29.
- [3] 闫林芳,刘巨,石梦璇,等. 基于模糊逻辑算法的直流微电网复合储能系统功率自适应分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9):2658-2670.
YAN Linfang, LIU Ju, SHI Mengxuan, et al. Adaptive power allocation strategy based on fuzzy logic algorithm for hybrid energy storage system in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9):2658-2670.
- [4] 程龙,张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3):100-104, 128.
CHENG Long, ZHANG Fanghua. Wavelet transform method for hybrid energy storage system smoothing power fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3):100-104, 128.
- [5] 李祥山,杨晓东,张有兵,等. 含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1):198-204.
LI Xiangshan, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. Coordinated control of DC microgrid considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1):198-204.
- [6] KOLLIMALLA S K, MISHRA M K, NARASAMMA N L. Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4):1137-1144.
- [7] MASIH-TEHRANI M, HA'IRI YAZDI M R, ESFAHANIAN V, et al. Wavelet-based power management for hybrid energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4):779-790.
- [8] XU Q, HU X L, WANG P, et al. A decentralized dynamic power sharing strategy for hybrid energy storage system in autonomous DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7):5930-5941.
- [9] XU Q W, XIAO J F, WANG P, et al. A decentralized control strategy for autonomous transient power sharing and state-of-charge recovery in hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4):1443-1452.
- [10] ZHANG M F, XU Q W, ZHANG C L, et al. Decentralized coordination and stabilization of hybrid energy storage systems in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3):1751-1761.
- [11] LIN P F, WANG P, XIAO J F, et al. An integral droop for transient power allocation and output impedance shaping of hybrid energy storage system in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7):6262-6277.
- [12] GU J P, XIE L Y, YANG X D, et al. Fuzzy piecewise coordinated control and stability analysis of the photovoltaic-storage direct current microgrid[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(15):3311-3324.
- [13] LIU S C, LI X A, XIA M Y, et al. Takagi-Sugeno multi-modeling-based large signal stability analysis of DC microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11):12670-12684.
- [14] 刘欣博,孙晓溪,宋晓通. 带恒功率负载的交直流混合微电网系统大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊1):115-125.
LIU Xinbo, SUN Xiaoxi, SONG Xiaotong. Large-disturbance stability analysis of hybrid AC/DC microgrid with constant power loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Supplement 1):115-125.
- [15] 张辉,杜明桥,孙凯,等. 双母线直流微电网的级联稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5):34-42.
ZHANG Hui, DU Mingqiao, SUN Kai, et al. Cascade stability analysis of double-bus DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5):34-42.
- [16] 朱晓荣,孟欣欣. 直流微电网的稳定性分析及有源阻尼控制研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(5):1670-1681.
ZHU Xiaorong, MENG Xinxin. Stability analysis and research of active damping control method for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5):1670-1681.
- [17] 杨小龙,程启明,褚思远,等. 孤岛模式下光储直流微电网变功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11):67-74, 81.
YANG Xiaolong, CHENG Qiming, CHU Siyuan, et al. Variable power control of photovoltaic-battery DC microgrid in islanding mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11):67-74, 81.
- [18] TAH A, DAS D. An enhanced droop control method for accurate load sharing and voltage improvement of isolated and interconnected DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3):1194-1204.
- [19] CHEN C, HUANG J A, WU D R, et al. Interval type-2 fuzzy disturbance observer-based T-S fuzzy control for a pneumatic flexible joint[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6):5962-5972.
- [20] 石辛民,郝整清. 模糊控制及其MATLAB仿真[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2018:99-101.
- [21] 郑凯元,杜文娟,王海风. 动态单元间交互作用对直流微电网稳定性影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23):7963-7980.
ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis on the stability of DC microgrid affected by interactions among dynamic components[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23):7963-7980.
- [22] 石涛,张斌,晁勤,等. 兼顾平抑风电波动和补偿预测误差的混合储能容量经济配比与优化控制[J]. 电网技术, 2016, 40(2):477-483.
SHI Tao, ZHANG Bin, CHAO Qin, et al. Economic storage ratio and optimal control of hybrid energy capacity combining stabilized wind power fluctuations with compensated predictive errors[J]. Power System Technology, 2016, 40(2):477-483.
- [23] 冯磊,杨淑连,徐达,等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10):44-50.
FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10):44-50.

作者简介:

张伟杰(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为分布式能源发电及控制(E-mail:1072428190@qq.com);

顾吉鹏(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为智能电网与新能源发电技术、复杂系统建模与控制(E-mail:2026321998@qq.com);

张有兵(1971—),男,教授,博士,主要研究方向为智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控(E-mail:youbingzhang@zjut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Power distribution control of islanded DC microgrid with hybrid energy storage based on T-S fuzzy logic

ZHANG Weijie¹, GU Jipeng¹, ZHANG Youbing¹, YANG Xiaodong², LOU Wei³, WANG Binjie¹

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Key Laboratory of New Energy Utilization and Energy Conservation of Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: In the direct current (DC) microgrid with hybrid energy storage, the traditional resistance-capacitance droop control can not solve the power distribution imbalance problem caused by the line resistance and load power fluctuation. Therefore, an adaptive resistance-capacitance droop control method based on Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy logic is proposed to realize the frequency division of hybrid energy storage. According to the physical characteristics of batteries and super capacitors, the T-S fuzzy logic relationship among the output voltage of a single battery branch, the output power difference between the battery groups and the resistive drop coefficient, and the T-S fuzzy logic relationship among the output power of a single supercapacitor branch and its change rate, the output power difference between the supercapacitor groups and the capacitive drop coefficient are established, based on which, a resistance-capacitance droop controller based on T-S fuzzy logic is constructed. The average impedance model of each part of DC microgrid with hybrid energy storage is derived, and the small signal stability of microgrid is studied by using impedance ratio analysis method. The MATLAB/Simulink simulative results show that the resistance-capacitance droop control based on T-S fuzzy logic can ensure the rational power distribution under the conditions of line resistance and load power fluctuation.

Key words: DC microgrid; hybrid energy storage; T-S fuzzy logic; power distribution; stability analysis

(上接第134页 continued from page 134)

Multiple time scale optimal scheduling of interconnected microgrids considering fault effects based on ADMM-GBS

WANG Yicong¹, KE Fangchao¹, ZHOU Hang^{2,3}, LIN Yujun^{2,3}, ZHANG Dongyin¹,

YANG Dongjun¹, MIAO Shihong^{2,3}

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Wuhan 430074, China)

Abstract: Extreme events attacking microgrids may result in insufficient load power supply and blackout. A distributed multiple time scale optimal scheduling strategy considering extreme events for interconnected microgrids system is proposed. Under fault conditions, with the goal of minimizing the load reduction on the user side of the system, a day-ahead and intra-day two stage rolling scheduling model for interconnected microgrids system is established. Based on the idea of robustness, taking into account the spatiotemporal characteristics of extreme events and the uncertainty of fault lines, the fault set is formed by hierarchical random sampling, which is used as initial data to determine the worst fault scenario for the system. After line reinforcement for this scenario, the alternative direction multiplier method with Gaussian back substitution is used to obtain the optimal fault scheduling strategy. The effectiveness of the proposed model and scheduling strategy is verified by an example analysis.

Key words: interconnected microgrids system; extreme events; distributed scheduling; multiple time scales

附录 A

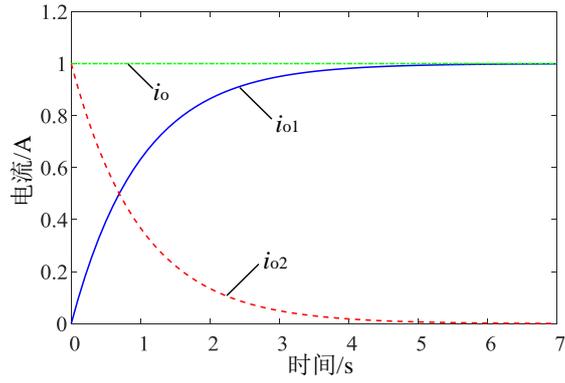


图 A1 混合储能的阶跃响应

Fig.A1 Step response of hybrid energy storage

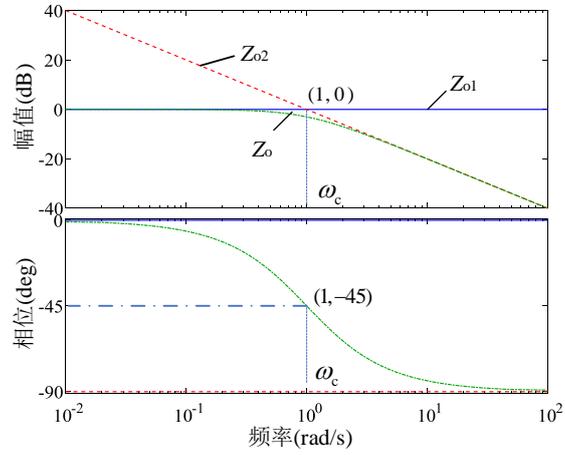


图 A2 系统阻抗特性

Fig.A2 Impedance characteristics of system

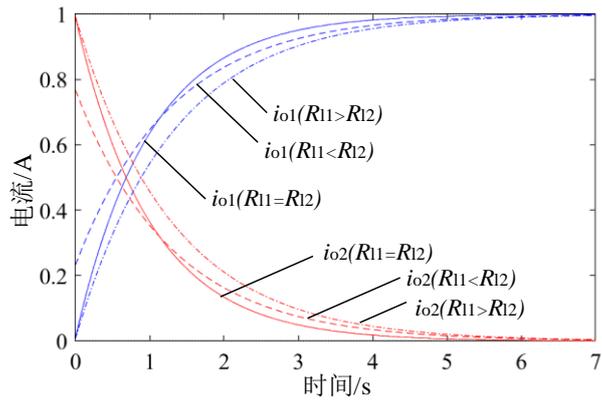
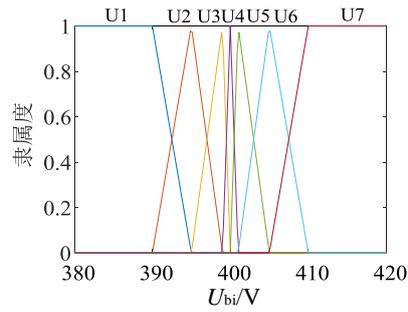
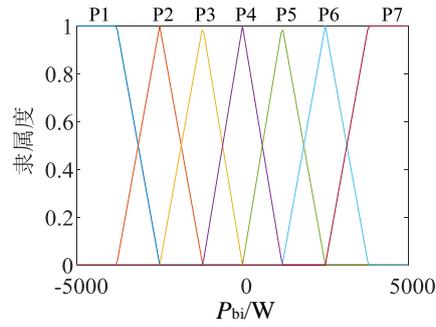


图 A3 混合储能的阶跃响应 (考虑线路电阻)

Fig.A3 Step response of hybrid energy storage (considering line resistance)



(a)输出电压隶属度函数



(b)功率差额隶属度函数

图 A4 蓄电池的隶属度函数

Fig.A4Membership functions of battery

表 A1 蓄电池的模糊控制规则

Table A1Fuzzy control ruleof battery

电压 U_{bi}	功率差额 ΔP_{bi}						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
U1	0.1	0.1	0.05	0	0	0	-0.05
U2	0.1	0.1	0.05	0	0	-0.02	-0.05
U3	0.1	0.05	0.02	0	-0.02	-0.05	-0.1
U4	0.1	0.05	0.02	0	-0.02	-0.05	-0.1
U5	0.1	0.05	0.02	0	-0.02	-0.05	-0.1
U6	0.05	0.02	0	0	-0.05	-0.1	-0.1
U7	0.02	0	0	0	-0.05	-0.1	-0.1

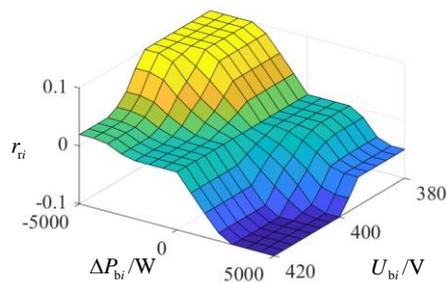
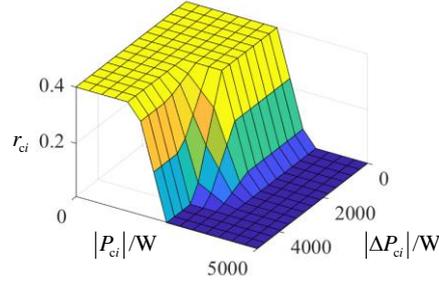
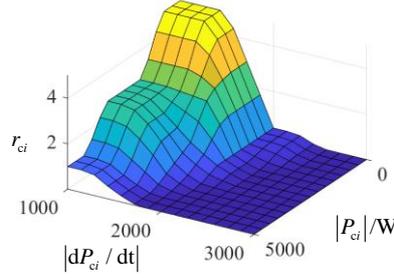


图 A5 蓄电池的曲面观测图

Fig.A5Surface of battery



(a) $|P_{ci}|$ 、 $|\Delta P_{ci}|$ 与 r_{ci} 的关系



(b) $|dP_{ci}/dt|$ 、 $|P_{ci}|$ 与 r_{ci} 的关系

图 A7 超级电容的曲面观测图

Fig.A7 Surface of supercapacitor

$$Z_{obi}(s) = -\frac{u_{bus}}{i_{boi}} = \frac{(1 + sC_{Bi}R_{lbi})(sL_{Bi} + G_1(s)u_{bus})}{s^2L_{Bi}C_{Bi} + sG_1(s)C_{Bi}u_{bus} + G_V(s)G_1(s)D_2(u_{bus} + i_{boi}R_{lbi})} \frac{(G_V(s)G_1(s)D_2(R_i' + R_{lbi})(u_{bus} + i_{boi}R_{lbi}))}{s^2L_{Bi}C_{Bi} + sG_1(s)C_{Bi}u_{bus} + G_V(s)G_1(s)D_2(u_{bus} + i_{boi}R_{lbi})} \quad (A1)$$

$$Z_{oci}(s) = -\frac{u_{bus}}{i_{coi}} = \frac{(1 + sC_{SCi}R_{lci})(sL_{SCi} + G_1(s)u_{bus})}{s^2L_{SCi}C_{SCi} + sG_1(s)C_{SCi}u_{bus} + G_V(s)G_1(s)D_4(u_{bus} + i_{coi}R_{lci})} \frac{G_V(s)G_1(s)D_4(C_i' + R_{lci})(u_{bus} + i_{coi}R_{lci})}{s^2L_{SCi}C_{SCi} + sG_1(s)C_{SCi}u_{bus} + G_V(s)G_1(s)D_4(u_{bus} + i_{coi}R_{lci})} \quad (A2)$$

式中： D_4 为超级电容变换器的平均占空比。

$$Z_{om}(s) = -\frac{u_d}{i_d} = \frac{sL_m + G_1(s)u_{bus}}{1 + s^2L_mC_m + sG_1(s)C_m u_{bus} + G_V(s)G_1(s)u_{bus}} \quad (A3)$$

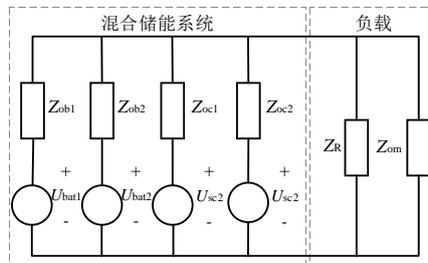


图 A8 直流微电网的等效电路

Fig.A8 Equivalent circuit of DC microgrid

其中： $U_{bati}(i=1,2)$ 为混合储能 i 中蓄电池的等效电压； U_{sci} 为混合储能 i 中超级电容的等效电压。

附录 B

当加入其他提供电能的元件时，混合储能充电，混合储能直流微电网等效电路图如图 B1 所示，直流微电网的输入输出阻抗如式(B1)所示。

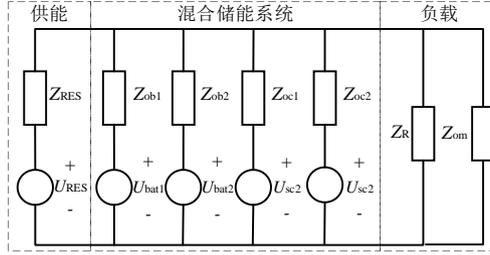


图 B1 直流微电网等效电路

Fig.B1 Equivalent circuit of DC microgrid

$$\begin{cases} Z_O(s) = Z_{RES} \\ Z_i(s) = \frac{Z_{ob1}Z_{oc1}}{Z_{ob1} + Z_{oc1}} // \frac{Z_{ob2}Z_{oc2}}{Z_{ob2} + Z_{oc2}} // \frac{Z_R Z_{om}}{Z_R + Z_{om}} \end{cases} \quad (B1)$$

其中： Z_{RES} 、 U_{RES} 分别为其他提供电能的元件的等效阻抗和等效电压。

附录 C

表 C1 系统参数设置

Table C1 Setting of system parameters

参数	取值
直流母线参考电压 U_{ref}/V	400
蓄电池额定电压 U_B/V	80
超级电容额定电压 U_{SC}/V	120
直流电机端电压 U_d/V	220
蓄电池容量 kW h	0.4
超级电容容量 kW h	0.1
阻性下垂系数 R'_i	0.3
容性下垂系数 C'_j	4.1
蓄电池电压环、电流环系数	2(20)、3(3)
超级电容电压环、电流环系数	2(20)、3(3)
直流电机电压环、电流环系数	10(2)、3(3)

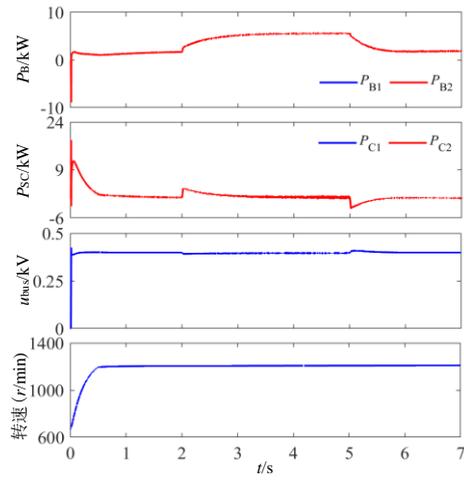


图 C1 工况 1 的仿真结果

Fig.C1 Simulative results of Working Condition 1

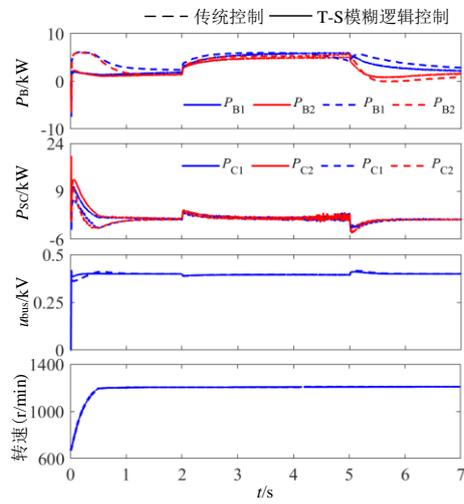


图 C2 工况 3 的仿真结果

Fig.C2 Simulative results of Working Condition 3