



(21) 申请号 202410877219.3

(22) 申请日 2024.07.02

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 118841933 A

(43) 申请公布日 2024.10.25

(73) 专利权人 武汉理工大学

地址 430070 湖北省武汉市洪山区珞狮路
122号

(72) 发明人 张尊华 周梦妮 杨祥国 王与凡

(74) 专利代理机构 武汉臻诚专利代理事务所

(普通合伙) 42233

专利代理师 宋业斌

(51) Int. Cl.

H02J 1/14 (2006.01)

H02J 1/00 (2006.01)

H02J 7/34 (2006.01)

H02J 3/36 (2006.01)

H02J 3/32 (2006.01)

H02J 3/14 (2006.01)

H02J 3/46 (2006.01)

H02J 3/06 (2006.01)

H02J 13/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 112124549 A, 2020.12.25

审查员 时海涛

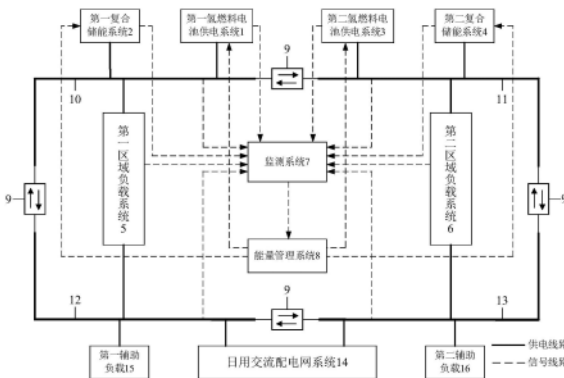
权利要求书7页 说明书17页 附图7页

(54) 发明名称

用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统及其工作方法

(57) 摘要

本发明公开了一种用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统,包括直流环网主系统、第一氢燃料电池供电系统(1)、第一复合储能系统(2)、第二氢燃料电池供电系统(3)、第二复合储能系统(4)、第一区域负载系统(5)、第二区域负载系统(6)、监测系统(7)、能量管理系统(8)、日用交流配电网系统(14)、第一辅助负载(15)、以及第二辅助负载(16),第一氢燃料电池供电系统(1)、第一复合储能系统(2)。直流环网主系统包括第一直流母线(10)、第二直流母线(11)、第三直流母线(12)、以及第四直流母线(13)。本发明能够解决现有辐射型供电系统由于负荷集中,导致容易引发输电线路过载的技术问题。



1. 一种用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,所述用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统包括直流环网主系统、第一氢燃料电池供电系统(1)、第一复合储能系统(2)、第二氢燃料电池供电系统(3)、第二复合储能系统(4)、第一区域负载系统(5)、第二区域负载系统(6)、监测系统(7)、能量管理系统(8)、日用交流配电网系统(14)、第一辅助负载(15)、以及第二辅助负载(16),第一氢燃料电池供电系统(1)、第一复合储能系统(2),直流环网主系统包括第一直流母线(10)、第二直流母线(11)、第三直流母线(12)、以及第四直流母线(13),这四根直流母线通过四个固态开关(9)首尾电连接;第一氢燃料电池供电系统(1)、第一复合储能系统(2)与第一直流母线电连接,第二氢燃料电池供电系统(3)、第二复合储能系统(4)与第二直流母线(11)电连接;第一区域负载系统(5)分别与第一直流母线(10)以及第三直流母线(12)电连接,第二区域负载系统(6)分别与第二直流母线(11)以及第四直流母线(13)电连接;监测系统(7)通过弱电信号线路分别与第一氢燃料电池供电系统(1)、第二氢燃料电池供电系统(3)、第一复合储能系统(2)、第二复合储能系统(4)、第一区域负载系统(5)、以及第二区域负载系统(6)电连接,并与第一直流母线(10)第二直流母线(11)、第三直流母线(12)、以及第四直流母线(13)电连接,以实时监测各个系统与直流母线的实时状态;能量管理系统(8)与监测系统(7)、第一氢燃料电池供电系统(1)、第二氢燃料电池供电系统(3)、第一复合储能系统(2)、以及第二复合储能系统(4)电连接;日用交流配电网系统(14)分别与第三直流母线(12)以及第四直流母线(13)电连接;第一辅助负载(15)与第三直流母线(12)电连接,第二辅助负载(16)与第四直流母线(13)电连接,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

(1) 第一氢燃料电池供电系统、第二氢燃料电池供电系统产生电能,并将其升压至500V分别输出至第一直流母线和第二直流母线,第三、第四直流母线通过固态开关与第一直流母线和第二直流母线电连接,以获得500V的直流电压,同时监测系统根据第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的输出电压与输出电流判断二者的运行状态处于正常状态、过载状态、还是故障状态,如果二者皆处于正常状态,则转入步骤(5),如果其中一个处于故障状态、另一个处于正常状态或过载状态,则转入步骤(2),如果二者皆处于过载状态,则转入步骤(3),如果二者皆处于故障状态,则能量管理系统发出故障报警信号,并转入步骤(12);

(2) 能量管理系统发出故障报警信号,并自动切断发生故障的氢燃料电池供电系统与直流环网主系统的连接,同时监测系统判断另一个氢燃料电池供电系统中氢燃料电池的运行状态是正常状态还是过载状态,如果其处于正常状态,则进入步骤(5),如果其处于过载状态,则进入步骤(3);

(3) 能量管理系统发出过载报警信号,并自动降低处于过载状态的氢燃料电池的输出功率至额定输出功率,并判断此时第一直流母线和第二直流母线的电压是否出现严重跌落,如果是则进入步骤(4),否则进入步骤(5);

(4) 能量管理系统依据重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除,直到处于过载状态的氢燃料电池供电系统恢复至正常状态、且第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止,然后进入步骤(5);

(5) 能量管理系统向第一复合储能系统和第二复合储能系统发送控制指令,使第一复合储能系统和第二复合储能系统全部进入电压波动平抑模式,然后转入步骤(6);

(6) 能量管理系统获取来自监测系统采集的第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载的电压与电流信号,并根据各自的电压与电流信号生成对应的功率信号,采用二阶滤波控制策略对该功率信号进行分解,以得到第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率、第二复合储能系统中第二锂电池的参考功率、第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率、以及第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率,然后进入步骤(7);

(7) 判断第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率是否大于其最大功率,如果是,则能量管理系统将第一锂电池的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(8),否则直接转入步骤(8);

(8) 判断第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率是否大于其最大功率,如果是则能量管理系统将第一超级电容的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(9),否则直接转入步骤(9);

(9) 判断第二复合储能系统中第二锂电池的参考功率是否大于其最大功率,如果是则能量管理系统将第二锂电池的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(10),否则直接转入步骤(10);

(10) 判断第二复合储能系统中第二超级电容参考功率是否大于其最大功率,如果是则能量管理系统将第二超级电容的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(11),否则直接转入步骤(11)

(11) 第一复合储能系统中的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式使其中第一锂电池和第一超级电容的功率分别保持在其参考功率附近,同时第二复合储能系统中的双向直流变换器采用功率跟踪控制策略,使其中第二锂电池和第二超级电容的功率分别保持在其参考功率附近,然后进入步骤(20);

(12) 第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式,第二复合储能系统中第二锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式,然后进入步骤(13);

(13) 监测系统监测第一复合储能系统中第一锂电池的功率是否超过其最大功率,如果超过则判断第一锂电池处于过载状态,能量管理系统控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号,并自动降低第一锂电池的功率至最大功率120kW,转入步骤(14),如果未超过,则直接转入步骤(14);

(14) 监测系统监测第二复合储能系统中的第二锂电池的功率是否超过其最大功率,如果超过则判断第二锂电池处于过载状态,则能量管理系统控制第二复合储能系统中第二锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号并自动降低第二锂电池的功率至最大功率,然后转入步骤(15);如果未超过,则直接转入步骤(15);

(15) 监测系统监测第一直流母线和第二直流母线的电压值,并判断此时第一直流母线和第二直流母线电压是否出现严重跌落,如果是,则能量管理系统依据负载重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除,直到第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止,然后进入步骤(16),否则直接转入步骤(16);

(16) 能量管理系统获取监测系统采集的第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一

辅助负载、第二辅助负载的电压与电流信号,并根据各自的电压与电流信号生成对应的功率信号,采用一阶滤波策略该功率信号进行分解,以得到第一复合储能系统中第一超级电容的功率参考值、以及第二复合储能系统中第二超级电容的功率参考值,然后进入步骤(17);

(17) 判断第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率是否大于其最大功率,如果是,则能量管理系统将第一超级电容的参考功率调整为其最大功率,并转入步骤(18),否则直接转入步骤(18);

(18) 判断第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率是否大于其最大功率,如果是,则能量管理系统将第二超级电容的参考功率调整为其最大功率,并转入步骤(19),否则直接转入步骤(19);

(19) 第一复合储能系统中第一超级电容的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式,使第一超级电容的功率保持在其参考功率附近,同时第二复合储能系统中第二超级电容的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式,使第二超级电容的功率保持在其参考功率附近,然后进入步骤(20);

(20) 监测系统监测第一直流母线、第二直流母线、第三直流母线、第四直流母线的差动电流,并判断四个差动电流中的任何一个是否超过设定阈值,如果是则判断该差动电流所在直流母线的区域内发生短路故障,然后进入步骤(21),否则进入步骤(29);

(21) 监测系统产生保护信号,并判断该短路的直流母线是否连接有氢燃料电池供电系统和复合储能系统,如果有则进入步骤(22),否则进入步骤(27);

(22) 监测系统将保护信号发送至与短路的直流母线电连接且最近的固态开关,以及与该短路的直流母线电连接的氢燃料电池供电系统、复合储能系统、区域负载系统内的保护模块;保护模块将该短路的直流母线与这些氢燃料电池供电系统、复合储能系统、区域负载系统隔离;固态开关断开,以将该短路的直流母线和与其电连接的其他直流母线隔离,然后进入步骤(23);

(23) 位于该短路的直流母线连接的区域负载系统相对于该短路的直流母线另一侧的直流母线对与该短路的直流母线电连接的区域负载系统进行供电;直流环网主系统从由双燃料电池供电系统和双复合储能系统供电转为由单个氢燃料电池供电系统和单个复合储能系统供电,同时监测系统判断该单个氢燃料电池供电系统的运行状态是处于正常状态、过载状态还是故障状态,如果处于正常状态,则转入步骤(26),如果处于过载状态,则转入步骤(24),如果处于故障状态,则转入步骤(25);

(24) 能量管理系统发出过载报警信号,并自动降低该单个氢燃料电池供电系统的输出功率至额定输出功率,并判断此时第一直流母线和第二直流母线的电压是否出现严重跌落,如果是则转入步骤(26),否则转入步骤(27);

(25) 能量管理系统发出故障报警信号,并将单个复合储能系统中锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式,同时监测系统判断该单个复合储能系统中锂电池的功率是否超过其最大功率,如果是则说明锂电池处于过载状态,能量管理系统控制该单个复合储能系统中锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号,并自动降低单个复合储能系统中锂电池的功率至最大功率,然后转入步骤(26),否则转入步骤(28);

(26) 能量管理系统依据重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负

载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除,直至第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止,然后进入步骤(28),

(27) 监测系统将保护信号发送至与短路的直流母线电连接且最近的固态开关,以及与该短路的直流母线电连接的区域负载系统内的保护模块,保护模块将该短路直流母线与区域负载系统隔离;固态开关断开,以将该短路的直流母线和与其电连接的其他直流母线隔离,位于该短路的直流母线连接的区域负载系统相对于该短路的直流母线另一侧的直流母线对与该短路的直流母线电连接的区域负载系统进行供电,然后进入步骤(28);

(28) 直流环网主系统转为开环运行,并处理短路的直流母线的故障,然后进入步骤(29);

(29) 直流环网主系统保持闭环运行,过程结束。

2. 根据权利要求1所述的用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,其特征在于,

步骤(1)中,监测系统根据第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的输出电压与输出电流计算输出功率,当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统启动正常,且输出功率不超过120kW时,氢燃料电池处于正常状态;当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统启动正常,但输出功率超过120kW,则氢燃料电池供电系统处于过载状态;当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统无法启动或输出功率为0kW,则氢燃料电池供电系统处于故障状态;

步骤(4)中第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、以及日用负载按照各自的重要性分类成一类负载、二类负载和三类负载;其中一类负载是对于氢能驱动船舶的安全和基本操作至关重要、且必须始终保持被供电的负载,二类负载是对氢能驱动船舶的运行和舒适性至关重要、但在紧急情况下能够短时间被停止供电的负载;三类负载是对氢能驱动船舶的日常运行有帮助、但在紧急情况下能够长时间被停止供电的负载。

3. 根据权利要求2所述的用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,其特征在于,步骤(6)具体为,监测系统采集第一区域负载系统的电压与电流信号、第一辅助负载的电压与电流信号、第二区域负载系统的电压与电流信号、第二辅助负载的电压与电流信号,并将第一区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第一区域负载系统的功率信号,将第一辅助负载的电压与电流信号相乘转换第一辅助负载的功率信号,将第二区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第二区域负载系统的功率信号、将第二辅助负载的电压与电流信号相乘转换第二辅助负载的功率信号,随后将第一区域负载系统的功率信号与第一辅助负载的功率信号相加得到第一总功率信号,将第二区域负载系统的功率信号与第二辅助负载的功率信号相加得到第二总功率信号;其后,将第一总功率信号和第二总功率信号发送至能量管理系统,能量管理系统采用二阶滤波策略对第一总功率信号进行分解,得到第一低频功率、第一中频功率与第一高频功率,对第二总功率信号分解得到第二低频功率、第二中频功率与第二高频功率;其后,将第一与第二低频功率相加得到第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的总参考输出功率,该功率由第一与第二氢燃料电池供电系统均分承担,将第一中频功率作为第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率,第一高频功率作为第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率,第二中频功率作为第二

复合储能系统中第二锂电池的参考功率,第二高频功率作为第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率。

4. 根据权利要求3所述的用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,其特征在于,

步骤(11)中第一复合储能系统的功率跟踪控制过程具体为,首先,第一复合储能系统中的双向直流变换器获取监测系统采集的第一锂电池的实际输出电压 V_b 和第一超级电容的实际输出电压 V_{sc} ,将第一锂电池的参考功率 P_{ref_b} 除以第一锂电池的实际输出电压 V_b ,得到第一锂电池的参考输出电流 I_{ref_b} ,并将第一超级电容的参考功率 P_{ref_sc} 除以第一超级电容的实际输出电压 V_{sc} ,得到第一超级电容的参考输出电流 I_{ref_sc} ;随后,将第一锂电池的参考输出电流 I_{ref_b} 与第一锂电池的实际输出电流 I_b 相减,得到电流误差 ΔI_b ,将参考电流 I_{ref_sc} 和第一超级电容的实际输出电流 I_{sc} 相减,得到电流误差 ΔI_{sc} ;其后,电流误差 ΔI_b 、 ΔI_{sc} 分别经过PI控制器,得到用于控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器的占空比信号 D_b 与第一复合储能系统中第一超级电容的双向直流变换器的占空比信号 D_{sc} ,然后占空比信号 D_b 、 D_{sc} 经脉冲宽度调制PWM控制第一复合储能系统中的第一锂电池的双向直流变换器与第一复合储能系统中的第一超级电容的双向直流变换器,进而调节第一锂电池与第一超级电容的功率,从而平滑环网供电系统的功率输出;

步骤(12)中第一锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式这一过程具体为,首先,将第一直流母线电压设定值 V_{ref} 与第一复合储能系统中的第一锂电池的双向直流变换器输出电压 V_b 相减得到电压差值 ΔV ;随后,电压差值 ΔV 经过PI控制器,得到占空比信号 D ,占空比信号 D 经PWM调制后控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器,进而维持第一直流母线电压的稳定。

5. 根据权利要求4所述的用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,其特征在于,步骤(16)具体为,监测系统采集第一区域负载系统的电压与电流信号、第一辅助负载的电压与电流信号、第二区域负载系统的电压与电流信号、第二辅助负载的电压与电流信号,并将第一区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第一区域负载系统的功率信号,将第一辅助负载的电压与电流信号相乘转换第一辅助负载的功率信号,将第二区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第二区域负载系统的功率信号、将第二辅助负载的电压与电流信号相乘转换第二辅助负载的功率信号,随后将第一区域负载系统的功率信号与第一辅助负载的功率信号相加得到第一总功率信号,将第二区域负载系统的功率信号与第二辅助负载的功率信号相加得到第二总功率信号;随后,将第一总功率信号和第二总功率信号发送至能量管理系统,能量管理系统采用一阶滤波策略对第一总功率信号进行分解,得到第一低频功率、第一高频功率,对第二总功率信号分解得到第二低频功率、第二高频功率;其后,将第一低频功率和第二低频功率相加得到总低频功率,该功率由第一复合储能系统和第二复合储能系统中的第一锂电池和第二锂电池均分承担,将第一高频功率作为第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率,第二高频功率作为第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率。

6. 根据权利要求5所述的用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,其特征在于,

步骤(23)中,当第一直流母线短路时,第一氢燃料电池供电系统、第一复合储能系统与

直流环网主系统断开,第一区域负载系统由第三直流母线进行供电;当第二直流母线短路时,第二氢燃料电池供电系统、第二复合储能系统与直流环网主系统断开,第二区域负载系统由第四直流母线进行供电;

步骤(27)中,当第三直流母线短路时,第一区域负载系统由第一直流母线供电;当第四直流母线短路时,第二区域负载系统由第四直流母线供电。

7.根据权利要求6所述的用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,其特征在于,第一区域负载系统(5)与第一辅助负载(15)设置于氢能驱动船舶的左舷区域,第二氢燃料电池供电系统(3)、第二复合储能系统(4)、第二区域负载系统(6)与第二辅助负载(16)设置于氢能驱动船舶的右舷区域;

第一氢燃料电池供电系统(1)和第二氢燃料电池供电系统(3)完全相同,第一复合储能系统(2)和第二复合储能系统(4)完全相同;

第一氢燃料电池供电系统(1)包括氢燃料电池(1-1)、升压直流变换器(1-2)、直流断路器(1-3)、以及保护模块(1-4),氢燃料电池(1-1)依次经过升压直流变换器(1-2)、直流断路器(1-3)、以及保护模块(1-4)与第一直流母线(10)电连接;

第一复合储能系统(2)包括锂电池(2-1)、第一双向直流变换器(2-3)、超级电容(2-2)、第二双向直流变换器(2-4)、直流断路器(2-5)、以及保护模块(2-6),锂电池(2-1)通过第一双向直流变换器(2-3)、直流断路器(2-5)、以及保护模块(2-6)与第一直流母线(10)电连接,超级电容(2-2)通过第二双向直流变换器(2-4)、直流断路器(2-5)、以及(保护模块2-6)与第一直流母线(10)电连接。

8.根据权利要求7所述的用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,其特征在于,

第一区域负载系统(5)和第二区域负载系统(6)完全相同,第一辅助负载(15)和第二辅助负载(16)完全相同;

第一区域负载系统(5)包括推进电机(5-1)、侧推器(5-2)、冲击负载(5-3)、DC/AC逆变器(5-4)、第一区域配电板(5-5)、保护模块(5-6)以及直流断路器(5-7),推进电机(5-1)、侧推器(5-2)和冲击负载(5-3)均通过DC/AC逆变器(5-4)、直流断路器(5-7)与第一区域配电板(5-5)电连接,第一区域配电板(5-5)通过保护模块(5-6)分别与第一直流母线(10)以及第二直流母线12电连接;

第一辅助负载(15)包括(保护模块15-1)、直流断路器(15-2)、DC/AC逆变器(15-3)、隔离变压器(15-4)、以及辅助设备(15-5),辅助设备(15-5)通过隔离变压器(15-4)、DC/AC逆变器(15-3)、直流断路器(15-2)、以及保护模块(15-1)连接至第三直流母线(12)。

9.根据权利要求8所述的用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,其特征在于,

日用交流配电网系统(14)包括保护模块(14-1)、直流断路器(14-2)、DC/AC逆变器(14-3)、隔离变压器(14-4)、交流断路器(14-5)、一对交流配电板(14-6)、母联开关14-7、以及一对日用负载(14-8);

第三直流母线(12)和第四直流母线(13)都经过保护模块(14-1)、直流断路器(14-2)、DC/AC逆变器(14-3)、隔离变压器(14-4)、交流断路器(14-5)、以及保护模块(14-1)分别连接至一个交流配电板(14-6);

两个交流配电板(14-6)通过母联开关(14-7)彼此连接,并通过交流断路器(14-5)分别为各自对应的一个日用负载(14-8)供电。

用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统及其工作方法

技术领域

[0001] 本发明属于船舶电力系统和供电系统技术领域,更具体地,涉及一种用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统及其工作方法。

背景技术

[0002] 氢能驱动船舶是一种高能量利用效率的新型绿色船舶,能够减少化石燃料消耗和航行中的污染物排放。传统机械推进系统存在噪声大、调速范围小、灵活性和经济性差等问题,而氢燃料电池作为一种新型绿色动力装置,具有零排放、无污染、可再生等特点,可替代内燃机,实现船舶动力系统的转型升级。氢燃料电池能量密度高、转换效率高、环境适应性强,是理想的船舶电力推进系统动力源。

[0003] 采用氢燃料电池作为主电源的船舶目前广泛采用辐射型供电系统作为直流供电系统,氢燃料电池与储能系统分别连接至两条直流母线上,并通过两条直流母线分配电力,两条直流母线由一个母联开关连接,左、右推进器、侧推器、辅助负载、日用负载等经变频器分别连接到两条直流母线上,其主要优点在于结构简单,投资成本低。

[0004] 然而,现有的辐射型供电系统存在一些不可忽略的缺陷:

[0005] 第一、电源与负载只能连接至两条直流母线上,使得两条直流母线需要配置更粗的电缆来获得更高的传输容量,且仅通过两条母线传输使得负荷更为集中,容易引发输电线路的过载问题,增加系统运行的风险;

[0006] 第二、该系统由于存在供电可靠性差和灵活性差的缺点,因此当母线故障或检修时,会导致所有与母线连接的负载断电,从而影响所有连接的电源和负载;

[0007] 第三、该系统采用锂电池作为储能系统的电源,在长期使用中可能需要频繁更换元件,增加维护成本,且控制模式单一,调度运行不够灵活,限制了对潮流变化的适应能力,也难以兼顾多种性能需求。

发明内容

[0008] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明提供了一种用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统及其工作方法,其目的在于,解决现有辐射型供电系统由于负荷集中,导致容易引发输电线路过载的技术问题,以及故障隔离能力差、故障恢复时间长、供电可靠性低的技术问题,以及控制模式单一、调度运行不够灵活、难以适应潮流变化、难以兼顾各种性能需求的技术问题。

[0009] 为实现上述目的,按照本发明的一个方面,提供了一种用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统,包括直流环网主系统、第一氢燃料电池供电系统(1)、第一复合储能系统(2)、第二氢燃料电池供电系统(3)、第二复合储能系统(4)、第一区域负载系统(5)、第二区域负载系统(6)、监测系统(7)、能量管理系统(8)、日用交流配电网系统(14)、第一辅助负载(15)、以及第二辅助负载(16),第一氢燃料电池供电系统(1)、第一复合储能系统(2),直流环网主系统包括第一直流母线(10)、第二直流母线(11)、第三直流母线(12)、以及第四直

流母线(13),这四根直流母线通过四个固态开关(9)首尾电连接;

[0010] 第一氢燃料电池供电系统(1)、第一复合储能系统(2)与第一直流母线电连接,第二氢燃料电池供电系统(3)、第二复合储能系统(4)与第二直流母线(11)电连接;

[0011] 第一区域负载系统(5)分别与第一直流母线(10)以及第三直流母线(12)电连接,第二区域负载系统(6)分别与第二直流母线(11)以及第四直流母线(13)电连接;

[0012] 监测系统(7)通过弱电信号线路分别与第一氢燃料电池供电系统(1)、第二氢燃料电池供电系统(3)、第一复合储能系统(2)、第二复合储能系统(4)、第一区域负载系统(5)、以及第二区域负载系统(6)电连接,并与第一直流母线(10)第二直流母线(11)、第三直流母线(12)、以及第四直流母线(13)电连接,以实时监测各个系统与直流母线的实时状态;

[0013] 能量管理系统(8)与监测系统(7)、第一氢燃料电池供电系统(1)、第二氢燃料电池供电系统(3)、第一复合储能系统(2)、以及第二复合储能系统(4)电连接;

[0014] 日用交流配电网系统(14)分别与第三直流母线(12)以及第四直流母线(13)电连接;

[0015] 第一辅助负载(15)与第三直流母线(12)电连接,第二辅助负载(16)与第四直流母线(13)电连接。

[0016] 优选地,第一区域负载系统(5)与第一辅助负载(15)设置于氢能驱动船舶的左舷区域,第二氢燃料电池供电系统(3)、第二复合储能系统(4)、第二区域负载系统(6)与第二辅助负载(16)设置于氢能驱动船舶的右舷区域;

[0017] 第一氢燃料电池供电系统(1)和第二氢燃料电池供电系统(3)完全相同,第一复合储能系统(2)和第二复合储能系统(4)完全相同;

[0018] 第一氢燃料电池供电系统(1)包括氢燃料电池(1-1)、升压直流变换器(1-2)、直流断路器(1-3)、以及保护模块(1-4),氢燃料电池(1-1)依次经过升压直流变换器(1-2)、直流断路器(1-3)、以及保护模块(1-4)与第一直流母线(10)电连接;

[0019] 第一复合储能系统(2)包括锂电池(2-1)、第一双向直流变换器(2-3)、超级电容(2-2)、第二双向直流变换器(2-4)、直流断路器(2-5)、以及保护模块(2-6),锂电池(2-1)通过第一双向直流变换器(2-3)、直流断路器(2-5)、以及保护模块(2-6)与第一直流母线(10)电连接,超级电容(2-2)通过第二双向直流变换器(2-4)、直流断路器(2-5)、以及(保护模块2-6)与第一直流母线(10)电连接。

[0020] 优选地,第一区域负载系统(5)和第二区域负载系统(6)完全相同,第一辅助负载(15)和第二辅助负载(16)完全相同;

[0021] 第一区域负载系统(5)包括推进电机(5-1)、侧推器(5-2)、冲击负载(5-3)、DC/AC逆变器(5-4)、第一区域配电板(5-5)、保护模块(5-6)以及直流断路器(5-7),推进电机(5-1)、侧推器(5-2)和冲击负载(5-3)均通过DC/AC逆变器(5-4)、直流断路器(5-7)与第一区域配电板(5-5)电连接,第一区域配电板(5-5)通过保护模块(5-6)分别与第一直流母线(10)以及第二直流母线12电连接;

[0022] 第一辅助负载(15)包括(保护模块15-1)、直流断路器(15-2)、DC/AC逆变器(15-3)、隔离变压器(15-4)、以及辅助设备(15-5),辅助设备(15-5)通过隔离变压器(15-4)、DC/AC逆变器(15-3)、直流断路器(15-2)、以及保护模块(15-1)连接至第三直流母线(12)。

[0023] 优选地,日用交流配电网系统(14)包括保护模块(14-1)、直流断路器(14-2)、DC/

AC逆变器(14-3)、隔离变压器(14-4)、交流断路器(14-5)、一对交流配电板(14-6)、母联开关14-7、以及一对日用负载(14-8)；

[0024] 第三直流母线(12)和第四直流母线(13)都经过保护模块(14-1)、直流断路器(14-2)、DC/AC逆变器(14-3)、隔离变压器(14-4)、交流断路器(14-5)、以及保护模块(14-1)分别连接至一个交流配电板(14-6)；

[0025] 两个交流配电板(14-6)通过母联开关(14-7)彼此连接,并通过交流断路器(14-5)分别为各自对应的一个日用负载(14-8)供电。

[0026] 按照本发明的另一方面,提供了一种用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,包括以下步骤:

[0027] (1) 第一氢燃料电池供电系统、第二氢燃料电池供电系统产生电能,并将其升压至500V分别输出至第一直流母线和第二直流母线,第三、第四直流母线通过固态开关与第一直流母线和第二直流母线电连接,以获得500V的直流电压,同时监测系统根据第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的输出电压与输出电流判断二者的运行状态处于正常状态、过载状态、还是故障状态,如果二者皆处于正常状态,则转入步骤(5),如果其中一个处于故障状态、另一个处于正常状态或过载状态,则转入步骤(2),如果二者皆处于过载状态,则转入步骤(3),如果二者皆处于故障状态,则能量管理系统发出故障报警信号,并转入步骤(12)；

[0028] (2) 能量管理系统发出故障报警信号,并自动切断发生故障的氢燃料电池供电系统与直流环网主系统的连接,同时监测系统判断另一个氢燃料电池供电系统中氢燃料电池的运行状态是正常状态还是过载状态,如果其处于正常状态,则进入步骤(5),如果其处于过载状态,则进入步骤(3)；

[0029] (3) 能量管理系统发出过载报警信号,并自动降低处于过载状态的氢燃料电池的输出功率至额定输出功率,并判断此时第一直流母线和第二直流母线的电压是否出现严重跌落,如果是则进入步骤(4),否则进入步骤(5)；

[0030] (4) 能量管理系统依据重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除,直到处于过载状态的氢燃料电池供电系统恢复至正常状态、且第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止,然后进入步骤(5)；

[0031] (5) 能量管理系统向第一复合储能系统和第二复合储能系统发送控制指令,使第一复合储能系统和第二复合储能系统全部进入电压波动平抑模式,然后转入步骤(6)；

[0032] (6) 能量管理系统获取来自监测系统采集的第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载的电压与电流信号,并根据各自的电压与电流信号生成对应的功率信号,采用二阶滤波控制策略对该功率信号进行分解,以得到第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率、第二复合储能系统中第二锂电池的参考功率、第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率、以及第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率,然后进入步骤(7)；

[0033] (7) 判断第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率是否大于其最大功率,如果是,则能量管理系统将第一锂电池的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(8),否则直接转入步骤(8)；

[0034] (8) 判断第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率是否大于其最大功率, 如果是则能量管理系统将第一超级电容的参考功率调整为其最大功率, 然后转入步骤(9), 否则直接转入步骤(9);

[0035] (9) 判断第二复合储能系统中第二锂电池的参考功率是否大于其最大功率, 如果是则能量管理系统将第二锂电池的参考功率调整为其最大功率, 然后转入步骤(10), 否则直接转入步骤(10);

[0036] (10) 判断第二复合储能系统中第二超级电容参考功率是否大于其最大功率, 如果是则能量管理系统将第二超级电容的参考功率调整为其最大功率, 然后转入步骤(11), 否则直接转入步骤(11)

[0037] (11) 第一复合储能系统中的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式使其中第一锂电池和第一超级电容的功率分别保持在其参考功率附近, 同时第二复合储能系统中的双向直流变换器采用功率跟踪控制策略, 使其中第二锂电池和第二超级电容的功率分别保持在其参考功率附近, 然后进入步骤(20);

[0038] (12) 第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式, 第二复合储能系统中第二锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式, 然后进入步骤(13);

[0039] (13) 监测系统监测第一复合储能系统中第一锂电池的功率是否超过其最大功率, 如果超过则判断第一锂电池处于过载状态, 能量管理系统控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号, 并自动降低第一锂电池的功率至最大功率 120kW, 转入步骤(14), 如果未超过, 则直接转入步骤(14);

[0040] (14) 监测系统监测第二复合储能系统中的第二锂电池的功率是否超过其最大功率, 如果超过则判断第二锂电池处于过载状态, 则能量管理系统控制第二复合储能系统中第二锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号并自动降低第二锂电池的功率至最大功率, 然后转入步骤(15); 如果未超过, 则直接转入步骤(15);

[0041] (15) 监测系统监测第一直流母线和第二直流母线的电压值, 并判断此时第一直流母线和第二直流母线电压是否出现严重跌落, 如果是, 则能量管理系统依据负载重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除, 直到第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止, 然后进入步骤(16), 否则直接转入步骤(16);

[0042] (16) 能量管理系统获取监测系统采集的第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载的电压与电流信号, 并根据各自的电压与电流信号生成对应的功率信号, 采用一阶滤波策略该功率信号进行分解, 以得到第一复合储能系统中第一超级电容的功率参考值、以及第二复合储能系统中第二超级电容的功率参考值, 然后进入步骤(17);

[0043] (17) 判断第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率是否大于其最大功率, 如果是, 则能量管理系统将第一超级电容的参考功率调整为其最大功率, 并转入步骤(18), 否则直接转入步骤(18);

[0044] (18) 判断第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率是否大于其最大功率, 如果是, 则能量管理系统将第二超级电容的参考功率调整为其最大功率, 并转入步骤(19), 否

则直接转入步骤(19)；

[0045] (19) 第一复合储能系统中第一超级电容的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式,使第一超级电容的功率保持在其参考功率附近,同时第二复合储能系统中第二超级电容的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式,使第二超级电容的功率保持在其参考功率附近,然后进入步骤(20)；

[0046] (20) 监测系统监测第一直流母线、第二直流母线、第三直流母线、第四直流母线的差动电流,并判断四个差动电流中的任何一个是否超过设定阈值,如果是则判断该差动电流所在直流母线的区域内发生短路故障,然后进入步骤(21),否则进入步骤(29)；

[0047] (21) 监测系统产生保护信号,并判断该短路的直流母线是否连接有氢燃料电池供电系统和复合储能系统,如果有则进入步骤(22),否则进入步骤(27)；

[0048] (22) 监测系统将保护信号发送至与短路的直流母线电连接且最近的固态开关,以及与该短路的直流母线电连接的氢燃料电池供电系统、复合储能系统、区域负载系统内的保护模块;保护模块将该短路的直流母线与这些氢燃料电池供电系统、复合储能系统、区域负载系统隔离;固态开关断开,以将该短路的直流母线和与其电连接的其他直流母线隔离,然后进入步骤(23)；

[0049] (23) 位于该短路的直流母线连接的区域负载系统相对于该短路的直流母线另一侧的直流母线对与该短路的直流母线电连接的区域负载系统进行供电;直流环网主系统从由双燃料电池供电系统和双复合储能系统供电转为由单个氢燃料电池供电系统和单个复合储能系统供电,同时监测系统判断该单一氢燃料电池供电系统的运行状态是处于正常状态、过载状态还是故障状态,如果处于正常状态,则转入步骤(26),如果处于过载状态,则转入步骤(24),如果处于故障状态,则转入步骤(25)；

[0050] (24) 能量管理系统发出过载报警信号,并自动降低该单个氢燃料电池供电系统的输出功率至额定输出功率,并判断此时第一直流母线和第二直流母线的电压是否出现严重跌落,如果是则转入步骤(26),否则转入步骤(27)；

[0051] (25) 能量管理系统发出故障报警信号,并将单个复合储能系统中锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式,同时监测系统判断该单一复合储能系统中锂电池的功率是否超过其最大功率,如果是则说明锂电池处于过载状态,能量管理系统控制该单个复合储能系统中锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号,并自动降低单个复合储能系统中锂电池的功率至最大功率,然后转入步骤(26),否则转入步骤(28)；

[0052] (26) 能量管理系统依据重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除,直至第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止,然后进入步骤(28),

[0053] (27) 监测系统将保护信号发送至与短路的直流母线电连接且最近的固态开关,以及与该短路的直流母线电连接的区域负载系统内的保护模块,保护模块将该短路直流母线与区域负载系统隔离;固态开关断开,以将该短路的直流母线和与其电连接的其他直流母线隔离,位于该短路的直流母线连接的区域负载系统相对于该短路的直流母线另一侧的直流母线对与该短路的直流母线电连接的区域负载系统进行供电,然后进入步骤(28)；

[0054] (28) 直流环网主系统转为开环运行,并处理短路的直流母线的故障,然后进入步骤(29)；

[0055] (29) 直流环网主系统保持闭环运行,过程结束。

[0056] 优选地,步骤(1)中,监测系统根据第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的输出电压与输出电流计算输出功率,当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统启动正常,且输出功率不超过120kW时,氢燃料电池处于正常状态;当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统启动正常,但输出功率超过120kW,则氢燃料电池供电系统处于过载状态;当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统无法启动或输出功率为0kW,则氢燃料电池供电系统处于故障状态;

[0057] 步骤(4)中第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、以及日用负载按照各自的重要性分类成一类负载、二类负载和三类负载;其中一类负载是对于氢能驱动船舶的安全和基本操作至关重要、且必须始终保持被供电的负载,二类负载是对氢能驱动船舶的运行和舒适性至关重要、但在紧急情况下能够短时间被停止供电的负载;三类负载是对氢能驱动船舶的日常运行有帮助、但在紧急情况下能够长时间被停止供电的负载。

[0058] 优选地,步骤(6)具体为,监测系统采集第一区域负载系统的电压与电流信号、第一辅助负载的电压与电流信号、第二区域负载系统的电压与电流信号、第二辅助负载的电压与电流信号,并将第一区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第一区域负载系统的功率信号,将第一辅助负载的电压与电流信号相乘转换第一辅助负载的功率信号,将第二区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第二区域负载系统的功率信号、将第二辅助负载的电压与电流信号相乘转换第二辅助负载的功率信号,随后将第一区域负载系统的功率信号与第一辅助负载的功率信号相加得到第一总功率信号,将第二区域负载系统的功率信号与第二辅助负载的功率信号相加得到第二总功率信号;其后,将第一总功率信号和第二总功率信号发送至能量管理系统,能量管理系统采用二阶滤波策略对第一总功率信号进行分解,得到第一低频功率、第一中频功率与第一高频功率,对第二总功率信号分解得到第二低频功率、第二中频功率与第二高频功率;其后,将第一与第二低频功率相加得到第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的总参考输出功率,该功率由第一与第二氢燃料电池供电系统均分承担,将第一中频功率作为第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率,第一高频功率作为第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率,第二中频功率作为第二复合储能系统中第二锂电池的参考功率,第二高频功率作为第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率。

[0059] 优选地,步骤(11)中第一复合储能系统的功率跟踪控制过程具体为,首先,第一复合储能系统中的双向直流变换器获取监测系统采集的第一锂电池的实际输出电压 V_b 和第一超级电容的实际输出电压 V_{sc} ,将第一锂电池的参考功率 P_{ref_b} 除以第一锂电池的实际输出电压 V_b ,得到第一锂电池的参考输出电流 I_{ref_b} ,并将第一超级电容的参考功率 P_{ref_sc} 除以第一超级电容的实际输出电压 V_{sc} ,得到第一超级电容的参考输出电流 I_{ref_sc} ;随后,将第一锂电池的参考输出电流 I_{ref_b} 与第一锂电池的实际输出电流 I_b 相减,得到电流误差 ΔI_b ,将参考电流 I_{ref_sc} 和第一超级电容的实际输出电流 I_{sc} 相减,得到电流误差 ΔI_{sc} ;其后,电流误差 ΔI_b 、 ΔI_{sc} 分别经过PI控制器,得到用于控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器的占空比信号 D_b 与第一复合储能系统中第一超级电容的双向直流变换器的占空比信号 D_{sc} ,然后占空比信号 D_b 、 D_{sc} 经脉冲宽度调制PWM控制第一复合储能系统中的第一锂电

池的双向直流变换器与第一复合储能系统中的第一超级电容的双向直流变换器,进而调节第一锂电池与第一超级电容的功率,从而平滑环网供电系统的功率输出;

[0060] 步骤(12)中第一锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式这一过程具体为,首先,将第一直流母线电压设定值 V_{ref} 与第一复合储能系统中的第一锂电池的双向直流变换器输出电压 V_b 相减得到电压差值 ΔV ;随后,电压差值 ΔV 经过PI控制器,得到占空比信号D,占空比信号D经PWM调制后控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器,进而维持第一直流母线电压的稳定。

[0061] 优选地,步骤(16)具体为,监测系统采集第一区域负载系统的电压与电流信号、第一辅助负载的电压与电流信号、第二区域负载系统的电压与电流信号、第二辅助负载的电压与电流信号,并将第一区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第一区域负载系统的功率信号,将第一辅助负载的电压与电流信号相乘转换第一辅助负载的功率信号,将第二区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第二区域负载系统的功率信号、将第二辅助负载的电压与电流信号相乘转换第二辅助负载的功率信号,随后将第一区域负载系统的功率信号与第一辅助负载的功率信号相加得到第一总功率信号,将第二区域负载系统的功率信号与第二辅助负载的功率信号相加得到第二总功率信号;随后,将第一总功率信号和第二总功率信号发送至能量管理系统,能量管理系统采用一阶滤波策略对第一总功率信号进行分解,得到第一低频功率、第一高频功率,对第二总功率信号分解得到第二低频功率、第二高频功率;其后,将第一低频功率和第二低频功率相加得到总低频功率,该功率由第一复合储能系统和第二复合储能系统中的第一锂电池和第二锂电池均分承担,将第一高频功率作为第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率,第二高频功率作为第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率。

[0062] 优选地,步骤(23)中,当第一直流母线短路时,第一氢燃料电池供电系统、第一复合储能系统与直流环网主系统断开,第一区域负载系统由第三直流母线进行供电;当第二直流母线短路时,第二氢燃料电池供电系统、第二复合储能系统与直流环网主系统断开,第二区域负载系统由第四直流母线进行供电;

[0063] 步骤(27)中,当第三直流母线短路时,第一区域负载系统由第一直流母线供电;当第四直流母线短路时,第二区域负载系统由第四直流母线供电。

[0064] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比,能够取得下列有益效果:

[0065] (1) 本发明的柔性直流环网电力系统通过构建由多个分布式电源和负载组成的船舶微网,有效地分散了负荷,降低了单一路径的电流密度,从而提高了整个系统的供电容量与供电稳定性,因此能够解决现有辐射型供电系统由于负荷集中,导致容易引发输电线路过载的技术问题;

[0066] (2) 本发明柔性直流环网电力系统的工作方法由于采用了步骤(20)-(28),当某一段母线发生故障时,其能够采用相应的控制手段迅速隔离故障母线,由其他正常母线为与故障母线连接的负载进行供电,避免事故影响扩大,从而提高系统运行的可靠性,因此能够解决现有辐射型供电系统存在的故障隔离能力差、故障恢复时间长以及供电可靠性低的技术问题;

[0067] (3) 本发明柔性直流环网电力系统的工作方法由于采用了步骤(6)-(19),其通过

不同的控制方式实现了电压波动平抑和提供电能支撑的功能,电压波动平抑模式下能够使锂电池和超级电容承担不同频率的功率,使得系统具有灵活的母线潮流控制方式,可以快速转移负荷功率的波动,使直流母线的电压波动显著减少;在电能支撑模式下,锂电池控制模式转为电压定值控制方式以支撑母线电压,确保了系统在氢燃料电池供电系统故障时的供电连续性,同时对超级电容采用一阶滤波策略也能够保证一定的电压波动平抑效果,优化了能源利用,实现了高效、安全、可靠的运行,因此能够解决现有辐射型供电系统存在的控制模式单一、调度运行不够灵活、难以适应潮流变化、难以兼顾各种性能需求的技术问题。

附图说明

- [0068] 图1是本发明的整体布局结构示意图;
- [0069] 图2是本发明中的第一氢燃料电池供电系统的结构示意图;
- [0070] 图3是本发明中的第一复合储能系统的结构示意图;
- [0071] 图4是本发明中的第一区域负载系统的结构示意图;
- [0072] 图5是本发明中日用交流配电网系统的结构示意图;
- [0073] 图6是本发明中第一辅助负载的结构示意图;
- [0074] 图7是本发明环网供电系统的单线图;
- [0075] 图8是本发明中的复合储能系统在波动平抑模式下的二阶滤波控制策略图;
- [0076] 图9是本发明中复合储能系统的功率跟踪控制逻辑框图;
- [0077] 图10是本发明的模拟典型工况下复合储能系统不参与调节时直流母线电压图;
- [0078] 图11是本发明的模拟典型工况下复合储能系统参与调节时直流母线电压图;
- [0079] 图12是本发明中锂电池在孤岛供电模式下的电压定值控制方式逻辑框图;
- [0080] 图13是本发明中超级电容在孤岛供电模式下的一阶滤波控制策略图。

具体实施方式

[0081] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0082] 针对现有船舶直流电力推进系统完全选择性保护不足以及成本较高、系统控制稳定性较低的问题,本发明提供了一种氢能驱动船舶多源柔性直流环网电力系统,该系统采用直流环网传输和分配电能,由多组氢燃料电池与复合储能系统集成电能变换和供电功能,直接向区域内负载供电。该系统采用了紧凑性功能和结构设计,具备多端冗余供电和多重供电保护功能,能够为船舶电力提供高密度、安全和可靠供电。

[0083] 如图1所示,本发明提供了一种用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统,包括直流环网主系统、第一氢燃料电池供电系统1、第一复合储能系统2、第二氢燃料电池供电系统3、第二复合储能系统4、第一区域负载系统5、第二区域负载系统6、监测系统7、能量管理系统8、日用交流配电网系统14、第一辅助负载15、以及第二辅助负载16,其中,第一氢燃料电池供电系统1、第一复合储能系统2、第一区域负载系统5与第一辅助负载15设置于氢能驱

动船舶的左舷区域,第二氢燃料电池供电系统3、第二复合储能系统4、第二区域负载系统6与第二辅助负载16设置于氢能驱动船舶的右舷区域。

[0084] 直流环网主系统包括第一直流母线10、第二直流母线11、第三直流母线12、以及第四直流母线13,这四根直流母线通过四个固态开关9首尾电连接。

[0085] 第一氢燃料电池供电系统1、第一复合储能系统2与第一直流母线电连接,第二氢燃料电池供电系统3、第二复合储能系统4与第二直流母线11电连接。

[0086] 第一区域负载系统5分别与第一直流母线10以及第三直流母线12电连接,第二区域负载系统6分别与第二直流母线11以及第四直流母线13电连接。

[0087] 监测系统7通过弱电信号线路分别与第一氢燃料电池供电系统1、第二氢燃料电池供电系统3、第一复合储能系统2、第二复合储能系统4、第一区域负载系统5、以及第二区域负载系统6电连接,并同时与第一直流母线10、第二直流母线11、第三直流母线12、以及第四直流母线13电连接,以实时监测各系统与直流母线的实时状态。

[0088] 能量管理系统8与监测系统7、第一氢燃料电池供电系统1、第二氢燃料电池供电系统3、第一复合储能系统2、以及第二复合储能系统4电连接。

[0089] 日用交流配电网系统14分别与第三直流母线12以及第四直流母线13电连接。

[0090] 第一辅助负载15与第三直流母线12电连接,第二辅助负载16与第四直流母线13电连接。

[0091] 由于船舶的左舷区域与右舷区域采用对称布局,此处以左舷为例讨论各系统具体配置。

[0092] 如图2所示,第一氢燃料电池供电系统1包括氢燃料电池1-1、升压直流变换器1-2、直流断路器1-3、以及保护模块1-4,氢燃料电池1-1依次经过升压直流变换器1-2、直流断路器1-3、以及保护模块1-4与第一直流母线10电连接。

[0093] 具体而言,该氢燃料电池1-1额定功率为120kW,额定输出电压210V;该升压直流变换器1-2额定功率为120kW,低压侧电压输入范围10~400V,高压侧输出范围60~550V,直流断路器1-3最大工作电压600V,最大工作电流250A,保护模块1-4的额定电压500V,断路能力20kA,响应时间小于10ms,具备过压保护、过流保护、欠压保护、断路保护功能。

[0094] 如图3所示,第一复合储能系统2包括锂电池2-1、第一双向直流变换器2-3、超级电容2-2、第二双向直流变换器2-4、直流断路器2-5、以及保护模块2-6,锂电池2-1通过第一双向直流变换器2-3、直流断路器2-5、以及保护模块2-6与第一直流母线10电连接,超级电容2-2通过第二双向直流变换器2-4、直流断路器2-5、以及保护模块2-6与第一直流母线10电连接。

[0095] 具体而言,该锂电池2-1的容量为30kWh,额定电压为250V,超级电容2-2的容量为1kWh,额定电压为230V,第一双向直流变换器2-3的额定功率功率为30kW,第二双向直流变换器2-4的额定功率为50kW,直流断路器2-5的最大工作电压为600V,最大工作电流为100A,保护模块2-6的额定电压为500V,断路能力为20kA,具备过压保护、过流保护、欠压保护、断路保护功能。

[0096] 如图4所示,第一区域负载系统5包括推进电机5-1、侧推器5-2、冲击负载5-3、DC/AC逆变器5-4、第一区域配电板5-5、保护模块5-6以及直流断路器5-7,推进电机5-1、侧推器5-2和冲击负载5-3均通过DC/AC逆变器5-4和直流断路器5-7与第一区域配电板5-5电连接,

第一区域配电板5-5通过保护模块5-6分别与第一直流母线10以及第二直流母线12电连接。

[0097] 具体而言,推进电机5-1的额定功率为90kW,侧推器5-2的额定功率为20kW,冲击负载5-3是指雷达、舵机等短时间内产生高峰值电流或功率的负载,该类负载的功率总和在20kW以下,DC/AC逆变器5-4输出380V交流三相电,直流断路器5-7的最大工作电压为600V,最大工作电流为200A,保护模块5-6的额定电压为500V,断路能力为20kA,具备过压保护、过流保护、欠压保护、断路保护功能。

[0098] 如图5所示,日用交流配电网系统14包括保护模块14-1、直流断路器14-2、DC/AC逆变器14-3、隔离变压器14-4、交流断路器14-5、一对交流配电板14-6、母联开关14-7及一对日用负载14-8,第三直流母线12和第四直流母线13经保护模块14-1、直流断路器14-2、DC/AC逆变器14-3、隔离变压器14-4、交流断路器14-5、保护模块14-1分别连接至一个交流配电板14-6,两个交流配电板14-6通过母联开关14-7彼此连接,并通过交流断路器14-5分别为各自对应的一个日用负载14-8供电。

[0099] 具体而言,保护模块14-1的额定电压为500V,断路能力为20kA,直流断路器14-2的最大工作电压为600V,最大工作电流为50A,DC/AC逆变器14-3的额定功率为25kW,输出380V/50Hz交流三相电,隔离变压器14-4的额定容量为30kVA,输入电压为380V,输出电压为400V,交流断路器14-5的额定工作电压为400V,最大额定电流为75A。

[0100] 如图6所示,第一辅助负载15包括保护模块15-1、直流断路器15-2、DC/AC逆变器15-3、隔离变压器15-4、辅助设备15-5,辅助设备15-5通过隔离变压器15-4、DC/AC逆变器15-3、直流断路器15-2、以及保护模块15-1连接至第三直流母线12。

[0101] 具体而言,保护模块15-1的额定电压为500V,断路能力20kA,直流断路器15-2的最大工作电压为600V,最大工作电流为30A,DC/AC逆变器15-3的额定功率为15kW,输出380V/50Hz交流三相电,隔离变压器15-4的额定容量为20kVA,输入电压为380V,输出电压为400V,辅助设备15-5指导航设备、通信设备、应急设备、消防设备、船用泵、锚机、系泊设备等,其最大功率低于15kW。

[0102] 本发明的工作原理如下:

[0103] 首先,第一氢燃料电池供电系统1、第二氢燃料电池供电系统3产生电能并调制升压至500V,分别接入第一直流母线10与第二直流母线11。第一复合储能系统2、第二复合储能系统4分别接入至第一直流母线10、第二直流母线11;能量管理系统8通过监测系统7采集的各氢燃料电池供电系统、各复合储能系统的输出电压与输出电流、各直流母线的电压与电流、各区域负载的电压与电流值判断各系统的工作状态,并实施相应的控制策略;当第一氢燃料电池供电系统1、第二氢燃料电池供电系统3正常工作时,第一复合储能系统2、第二复合储能系统4处于电压波动平抑模式,通过二阶滤波控制策略实现对母线电压的波动平抑;当第一氢燃料电池供电系统1、第二燃料电池供电系统3出现故障时,第一复合储能系统2、第二复合储能系统4切换至孤岛供电模式,采用电压定值控制方式来维持第一直流母线、第二直流母线、第三直流母线、第四直流母线电压的稳定。

[0104] 在整个系统工作过程中,能量管理系统8会根据监测系统7采集的信号判断第一氢燃料电池供电系统1、第二氢燃料电池供电系统3与第一复合储能系统2、第二复合储能系统4是否处于异常过载状态,当监测到第一氢燃料电池供电系统1、第二氢燃料电池供电系统3过载时,能量管理系统8会发出报警信号并自动调节第一氢燃料电池供电系统1、第二氢燃

料电池供电系统3的输出功率,防止氢燃料电池1-1、氢燃料电池3-1内部电流过大,造成不可逆的损害;当监测到第一复合储能系统2、第二复合储能系统4过载时,能量管理系统8也能够自动调节第一复合储能系统2、第二复合储能系统4的充放电功率,避免超负荷运转。

[0105] 另外,当监测系统7监测到环网某段直流母线差动电流大于预设的差动信号阈值时,可确定该段直流母线发生短路故障,同时产生相应的保护信号,并发送至与该段直流母线电连接且最近的固态开关,使固态开关断开,同时切断该段直流母线电连接氢燃料电池供电系统、复合储能系统、负载系统,此时由与负载系统电连接的另一段直流母线为负载系统供电,这样任何一段直流母线发生故障时都可以快速隔离,开环运行,保证负载供电的连续性。

[0106] 本发明还提供了一种用于氢能驱动船舶的柔性直流环网供电系统的工作方法,包括以下步骤:

[0107] (1) 第一氢燃料电池供电系统、第二氢燃料电池供电系统产生电能,并将其升压至500V分别输出至第一直流母线和第二直流母线,第三、第四直流母线通过固态开关与第一直流母线和第二直流母线电连接,以获得500V的直流电压,同时监测系统根据第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的输出电压与输出电流判断二者的运行状态处于正常状态、过载状态、还是故障状态,如果二者皆处于正常状态,则转入步骤(5),如果其中一个处于故障状态、另一个处于正常状态或过载状态,则转入步骤(2),如果二者皆处于过载状态,则转入步骤(3),如果二者皆处于故障状态,则能量管理系统发出故障报警信号,并转入步骤(12)。

[0108] 具体而言,监测系统根据第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的输出电压与输出电流计算输出功率,当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统启动正常,且输出功率不超过120kW时,氢燃料电池处于正常状态;当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统启动正常,但输出功率超过120kW,则氢燃料电池供电系统处于过载状态;当第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统无法启动或输出功率为0kW,则氢燃料电池供电系统处于故障状态。

[0109] (2) 能量管理系统发出故障报警信号,并自动切断发生故障的氢燃料电池供电系统与直流环网主系统的连接,同时监测系统判断另一个氢燃料电池供电系统中氢燃料电池的运行状态是正常状态还是过载状态,如果其处于正常状态,则进入步骤(5),如果其处于过载状态,则进入步骤(3);

[0110] (3) 能量管理系统发出过载报警信号,并自动降低处于过载状态的氢燃料电池的输出功率至额定输出功率(在本实例中是120kW),并判断此时第一直流母线和第二直流母线的电压是否出现严重跌落(即跌落值超过额定母线电压的15%以上),如果是则进入步骤(4),否则进入步骤(5)。

[0111] (4) 能量管理系统依据重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除,直到处于过载状态的氢燃料电池供电系统恢复至正常状态、且第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止,然后进入步骤(5)。

[0112] 具体而言,本发明将所有的负载按照重要性分类成一类负载、二类负载和三类负载,一类负载指第一区域负载系统和第二区域负载系统中的推进电机、侧推器和冲击负载

中的雷达负载、舵机负载等,以及第一辅助负载和第二辅助负载中的导航设备、通信设备、消防设备、应急设备,一类负载对于船舶的安全和基本操作至关重要,必须始终保持供电;二类负载指日用负载中的空调负载、照明负载、船员住宿区电力负载等,二类负载对船舶的运行和舒适性非常重要,但在紧急情况下可以短时间内停止供电;三类负载指日用负载中的娱乐设备负载、非关键办公设备负载等,该类负载对船舶的日常运行有帮助,但在紧急情况下可以较长时间停止供电。

[0113] (5) 能量管理系统向第一复合储能系统和第二复合储能系统发送控制指令,使第一复合储能系统和第二复合储能系统全部进入电压波动平抑模式,然后转入步骤(6)。

[0114] (6) 能量管理系统获取来自监测系统采集的第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载的电压与电流信号,并根据各自的电压与电流信号生成对应的功率信号,采用二阶滤波控制策略对该功率信号进行分解,以得到第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率、第二复合储能系统中第二锂电池的参考功率、第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率、以及第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率,然后进入步骤(7)。

[0115] 具体而言,监测系统采集第一区域负载系统的电压与电流信号、第一辅助负载的电压与电流信号、第二区域负载系统的电压与电流信号、第二辅助负载的电压与电流信号,并将第一区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第一区域负载系统的功率信号,将第一辅助负载的电压与电流信号相乘转换第一辅助负载的功率信号,将第二区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第二区域负载系统的功率信号、将第二辅助负载的电压与电流信号相乘转换第二辅助负载的功率信号,随后将第一区域负载系统的功率信号与第一辅助负载的功率信号相加得到第一总功率信号,将第二区域负载系统的功率信号与第二辅助负载的功率信号相加得到第二总功率信号;其后,将第一总功率信号和第二总功率信号发送至能量管理系统,能量管理系统采用二阶滤波策略对第一总功率信号进行分解,得到第一低频功率、第一中频功率与第一高频功率,对第二总功率信号分解得到第二低频功率、第二中频功率与第二高频功率;其后,将第一与第二低频功率相加得到第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的总参考输出功率,该功率由第一与第二氢燃料电池供电系统均分承担,将第一中频功率作为第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率,第一高频功率作为第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率,第二中频功率作为第二复合储能系统中第二锂电池的参考功率,第二高频功率作为第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率。

[0116] 更具体而言,如图8所示,二阶滤波策略原理为:总功率信号经一阶滤波器后分为中低频混合功率与高频功率,随后将中低频混合功率再次经过一阶滤波器后得到低频功率与中频功率;以第一总功率信号为例,该总功率信号经二阶滤波分解后获得的参考功率表达式为:

$$[0117] \quad P_{ref_fc} = P_{load} \cdot \frac{1}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$$

$$[0118] \quad P_{ref_b} = \frac{1}{1 + T_1 s} \cdot \frac{T_2 s}{1 + T_2 s} \cdot P_{load}$$

$$[0119] \quad P_{ref_sc} = \frac{T_1 s}{1 + T_1 s} \cdot P_{load}$$

[0120] 其中,s为复变量, P_{load} 为第一总功率信号, $P_{ref_fc}/2$ 为第一氢燃料电池供电系统的参考功率,其与第二氢燃料电池供电系统的参考功率相等, P_{ref_b} 为第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率, P_{ref_sc} 为第一复合储能系统中超级电容的参考功率, T_1 与 T_2 为二阶滤波时间常数,通过调整 T_1 与 T_2 的大小可以达到不同的平抑效果,第二总功率信号的分解过程也与上同理。

[0121] (7) 判断第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率是否大于其最大功率,如果是,则能量管理系统将第一锂电池的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(8),否则直接转入步骤(8);

[0122] 具体而言,第一复合储能系统中第一锂电池和第二复合储能系统中第二锂电池的最大功率在波动平抑模式下为30kW,第一复合储能系统中第一超级电容和第二复合储能系统中第二超级电容的最大功率为60kW。

[0123] (8) 判断第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率是否大于其最大功率,如果是则能量管理系统将第一超级电容的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(9),否则直接转入步骤(9);

[0124] (9) 判断第二复合储能系统中第二锂电池的参考功率是否大于其最大功率,如果是则能量管理系统将第二锂电池的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(10),否则直接转入步骤(10);

[0125] (10) 判断第二复合储能系统中第二超级电容参考功率是否大于其最大功率,如果是则能量管理系统将第二超级电容的参考功率调整为其最大功率,然后转入步骤(11),否则直接转入步骤(11)

[0126] (11) 第一复合储能系统中的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式使其中第一锂电池和第一超级电容的功率分别保持在其参考功率附近,同时第二复合储能系统中的双向直流变换器采用功率跟踪控制策略,使其中第二锂电池和第二超级电容的功率分别保持在其参考功率附近,然后进入步骤(20)。

[0127] 具体而言,如图9所示,以第一复合储能系统为例,其中 $P_{ref_b/sc}$ 为第一超级电容的参考功率, $V_{b/sc}$ 为第一超级电容的实际输出电压, $I_{ref_b/sc}$ 为第一超级电容的参考输出电流, $I_{b/sc}$ 为第一超级电容的实际输出电流,D为占空比。本过程具体为,首先,第一复合储能系统中的双向直流变换器获取监测系统采集的第一锂电池的实际输出电压 V_B 和第一超级电容的实际输出电压 V_{sc} ,将第一锂电池的参考功率 P_{ref_b} 除以第一锂电池的实际输出电压 V_B ,得到第一锂电池的参考输出电流 I_{ref_b} ,并将第一超级电容的参考功率 P_{ref_sc} 除以第一超级电容的实际输出电压 V_{sc} ,得到第一超级电容的参考输出电流 I_{ref_sc} ;随后,将第一锂电池的参考输出电流 I_{ref_b} 与第一锂电池的实际输出电流 I_b 相减,得到电流误差 ΔI_b ,将参考电流 I_{ref_sc} 和第一超级电容的实际输出电流 I_{sc} 相减,得到电流误差 ΔI_{sc} ;其后,电流误差 ΔI_b 、 ΔI_{sc} 分别经过PI控制器,得到用于控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器的占空比信号 D_b 与第一复合储能系统中第一超级电容的双向直流变换器的占空比信号 D_{sc} ,然后占空比信号 D_b 、 D_{sc} 经脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation,简称PWM)控制第一复合储

能系统中的第一锂电池的双向直流变换器与第一复合储能系统中的第一超级电容的双向直流变换器,进而调节第一锂电池与第一超级电容的功率,从而平滑环网供电系统的功率输出;第二复合储能系统的功率跟踪控制也与上同理。

[0128] 更具体而言,如图10、图11所示,当第一复合储能系统和第二复合储能系统不参与电压调节时,典型工况下,第一直流母线10的电压最高峰值611.074V,最低谷值442.324V,峰谷值差为168.75V,占额定电压33.75%;当第一复合储能系统和第二复合储能系统参与电压调节时,典型工况下,第一直流母线10的电压最高峰值510.428V,最低谷值484.124V,峰谷值差为26.304V,占额定电压5.26%,相比于储能系统不参与电压调节下降了28.49%。

[0129] 上述步骤(1)到(11)的优点在于,通过实时监测和状态判断,系统能快速识别第一氢燃料电池供电系统和第二氢燃料电池供电系统的运行状态,确保设备的正常工作;其次,能量管理系统在过载情况下进行二次控制,自动降低功率并发出报警信号,保护设备免受损坏,同时,系统依据负载的重要性优先切除次要负载,保障了关键设备的正常运行,第一复合储能系统和第二复合储能系统采用二阶滤波控制策略对功率信号进行分解,使氢燃料电池、锂电池和超级电容分别承担不同频段的功率输出,优化了能源利用,使直流母线的电压波动显著减少,系统的稳定性大幅提升,实现了高效、安全、可靠的运行。

[0130] (12) 第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式(其用于支撑第一直流母线电压),第二复合储能系统中第二锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式(其用于支撑第二直流母线电压),然后进入步骤(13)。

[0131] 具体而言,如图12所示,以第一复合储能系统为例,电压定值控制方式原理如下:将第一直流母线电压设定值 V_{ref} 与第一复合储能系统中的第一锂电池的双向直流变换器输出电压 V_b 相减得到电压差值 ΔV ;随后,电压差值 ΔV 经过PI控制器,得到占空比信号D,占空比信号D经PWM调制后控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器,进而维持第一直流母线电压的稳定;第二复合储能系统也与上同理。

[0132] (13) 监测系统监测第一复合储能系统中第一锂电池的功率是否超过其最大功率,如果超过则判断第一锂电池处于过载状态,能量管理系统控制第一复合储能系统中第一锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号,并自动降低第一锂电池的功率至最大功率120kW,转入步骤(14),如果未超过,则直接转入步骤(14)。

[0133] 具体而言,第一复合储能系统和第二复合储能系统中第一锂电池和第二锂电池的最大功率在孤岛供电模式下设置为120kW。

[0134] (14) 监测系统监测第二复合储能系统中的第二锂电池的功率是否超过其最大功率,如果超过则判断第二锂电池处于过载状态,则能量管理系统控制第二复合储能系统中第二锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号并自动降低第二锂电池的功率至最大功率(在本实例中为120kW),然后转入步骤(15);如果未超过,则直接转入步骤(15)。

[0135] (15) 监测系统监测第一直流母线和第二直流母线的电压值,并判断此时第一直流母线和第二直流母线电压是否出现严重跌落(几跌落值超过额定母线电压的15%以上),如果是,则能量管理系统依据负载重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅助负载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除,直到第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止,然后进入步骤(16),否则直接转入步骤(16)。

[0136] (16) 能量管理系统获取监测系统采集的第一区域负载系统、第二区域负载系统、

第一辅助负载、第二辅助负载的电压与电流信号,并根据各自的电压与电流信号生成对应的功率信号,采用一阶滤波策略该功率信号进行分解,以得到第一复合储能系统中第一超级电容的功率参考值、以及第二复合储能系统中第二超级电容的功率参考值,然后进入步骤(17)。

[0137] 具体而言,监测系统采集第一区域负载系统的电压与电流信号、第一辅助负载的电压与电流信号、第二区域负载系统的电压与电流信号、第二辅助负载的电压与电流信号,并将第一区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第一区域负载系统的功率信号,将第一辅助负载的电压与电流信号相乘转换第一辅助负载的功率信号,将第二区域负载系统的电压与电流信号相乘转换为第二区域负载系统的功率信号、将第二辅助负载的电压与电流信号相乘转换第二辅助负载的功率信号,随后将第一区域负载系统的功率信号与第一辅助负载的功率信号相加得到第一总功率信号,将第二区域负载系统的功率信号与第二辅助负载的功率信号相加得到第二总功率信号;随后,将第一总功率信号和第二总功率信号发送至能量管理系统,能量管理系统采用一阶滤波策略对第一总功率信号进行分解,得到第一低频功率、第一高频功率,对第二总功率信号分解得到第二低频功率、第二高频功率;其后,将第一低频功率和第二低频功率相加得到总低频功率,该功率由第一复合储能系统和第二复合储能系统中的第一锂电池和第二锂电池均分承担,将第一高频功率作为第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率,第二高频功率作为第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率。

[0138] 更具体而言,如图13所示,总功率信号经一阶滤波器后分为低频功率与高频功率;以第一总功率信号为例,该信号经一阶滤波分解后获得的参考功率表达式为:

$$[0139] \quad P_{ref_b} = \frac{1}{1+T_1s} \cdot P_{load}$$

$$[0140] \quad P_{ref_sc} = \frac{T_1s}{1+T_1s} \cdot P_{load}$$

[0141] 其中,s为复变量, P_{load} 为第一总功率信号, $P_{ref_b}/2$ 为第一复合储能系统和第二复合储能系统中第一复合储能系统中第一锂电池的参考功率,其与第二复合储能系统中的第二锂电池参考功率相等, P_{ref_sc} 为第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率, T_1 为一阶滤波时间常数,通过调整 T_1 的大小可以达到不同的平抑效果,第二总功率信号的分解过程也与上同理。

[0142] (17)判断第一复合储能系统中第一超级电容的参考功率是否大于其最大功率,如果是,则能量管理系统将第一超级电容的参考功率调整为其最大功率,并转入步骤(18),否则直接转入步骤(18)。

[0143] (18)判断第二复合储能系统中第二超级电容的参考功率是否大于其最大功率,如果是,则能量管理系统将第二超级电容的参考功率调整为其最大功率,并转入步骤(19),否则直接转入步骤(19)。

[0144] (19)第一复合储能系统中第一超级电容的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式,使第一超级电容的功率保持在其参考功率附近,同时第二复合储能系统中第二超级电容的双向直流变换器采用功率跟踪控制方式,使第二超级电容的功率保持在其参考功率附

近,然后进入步骤(20)。

[0145] 上述步骤(12)到(19)的优点在于,当氢燃料电池供电系统故障时,将锂电池控制模式转为电压定值控制方式以支撑母线电压,确保了系统在氢燃料电池供电系统故障时的供电连续性,同时对超级电容采用一阶滤波策略也能够保证一定的电压波动平抑效果,优化了能源利用,实现了系统稳定的运行。

[0146] (20)监测系统监测第一直流母线、第二直流母线、第三直流母线、第四直流母线的差动电流(其等于该段直流母线的总流入电流与总流出电流之差),并判断四个差动电流中的任何一个是否超过设定阈值,如果是则判断该差动电流所在直流母线的区域内发生短路故障,然后进入步骤(21),否则进入步骤(29)。

[0147] 具体而言,差动电流阈值设置为25A。

[0148] (21)监测系统产生保护信号,并判断该短路的直流母线是否连接有氢燃料电池供电系统和复合储能系统,如果有,则说明需要对与该短路的直流母线连接的氢燃料电池供电系统与复合储能系统进行处理,然后进入步骤(22),否则进入步骤(27)。

[0149] (22)监测系统将保护信号发送至与短路的直流母线电连接且最近的固态开关,以及与该短路的直流母线电连接的氢燃料电池供电系统、复合储能系统、区域负载系统内的保护模块;保护模块将该短路的直流母线与这些氢燃料电池供电系统、复合储能系统、区域负载系统隔离;固态开关断开,以将该短路的直流母线和与其电连接的其他直流母线隔离,然后进入步骤(23)。

[0150] (23)位于该短路的直流母线连接的区域负载系统相对于该短路的直流母线另一侧的直流母线对该短路的直流母线电连接的区域负载系统进行供电;直流环网主系统从由双燃料电池供电系统和双复合储能系统供电转为由单个氢燃料电池供电系统和单个复合储能系统供电,同时监测系统判断该单一氢燃料电池供电系统的运行状态是处于正常状态、过载状态还是故障状态,如果处于正常状态,则转入步骤(26),如果处于过载状态,则转入步骤(24),如果处于故障状态,则转入步骤(25)。

[0151] 具体而言,当第一直流母线短路时,第一氢燃料电池供电系统、第一复合储能系统与直流环网主系统断开,第一区域负载系统由第三直流母线进行供电;当第二直流母线短路时,第二氢燃料电池供电系统、第二复合储能系统与直流环网主系统断开,第二区域负载系统由第四直流母线进行供电。

[0152] (24)能量管理系统发出过载报警信号,并自动降低该单个氢燃料电池供电系统的输出功率至额定输出功率(在本实例中为120kW),并判断此时第一直流母线和第二直流母线的电压是否出现严重跌落(即跌落值超过额定母线电压的15%以上),如果是则转入步骤(26),否则转入步骤(27),

[0153] (25)能量管理系统发出故障报警信号,并将单个复合储能系统中锂电池的双向直流变换器切换为电压定值控制方式,同时监测系统判断该单一复合储能系统中锂电池的功率是否超过其最大功率,如果是则说明锂电池处于过载状态,能量管理系统控制该单个复合储能系统中锂电池的双向直流变换器发出过载报警信号,并自动降低单个复合储能系统中锂电池的功率至最大功率(在本实例中为120kW),然后转入步骤(26),否则转入步骤(28)。

[0154] (26)能量管理系统依据重要性对第一区域负载系统、第二区域负载系统、第一辅

助负载、第二辅助负载、日用负载进行选择切除,直至第一直流母线和第二直流母线的电压保持稳定为止,然后进入步骤(28),

[0155] (27) 监测系统将保护信号发送至与短路的直流母线电连接且最近的固态开关,以及与该短路的直流母线电连接的区域负载系统内的保护模块,保护模块将该短路直流母线与区域负载系统隔离;固态开关断开,以将该短路的直流母线和与其电连接的其他直流母线隔离,位于该短路的直流母线连接的区域负载系统相对于该短路的直流母线另一侧的直流母线对与该短路的直流母线电连接的区域负载系统进行供电,然后进入步骤(28)。

[0156] 具体而言,当第三直流母线短路时,第一区域负载系统由第一直流母线供电;当第四直流母线短路时,第二区域负载系统由第四直流母线供电。

[0157] (28) 直流环网主系统转为开环运行,并处理短路的直流母线的故障,然后进入步骤(29)。

[0158] 上述步骤(20)到(28)的优点在于,直流环网主系统实现了完善的短路故障监测和处理机制,监测系统一旦发现短路故障能够迅速作出响应,产生相应的保护信号,以迅速、准确、有效地将故障直流母线充分进行隔离,最大限度地减少了故障对系统运行的影响,保证正常支路的运行,提高了系统的可靠性和稳定性。

[0159] (29) 直流环网主系统保持闭环运行,过程结束。

[0160] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

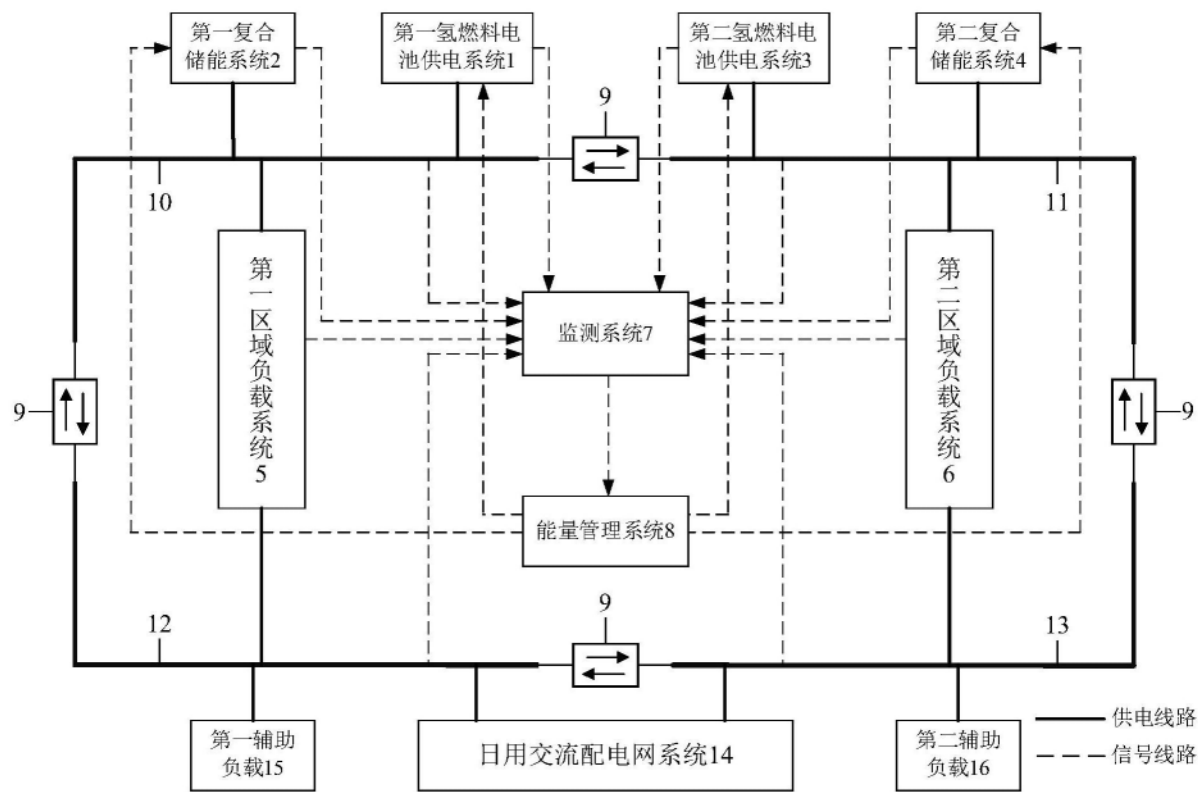


图1

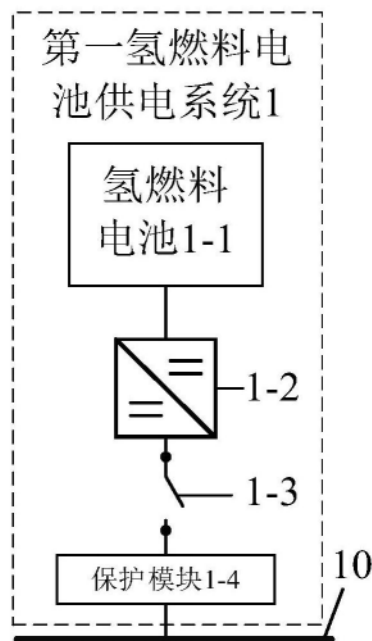


图2

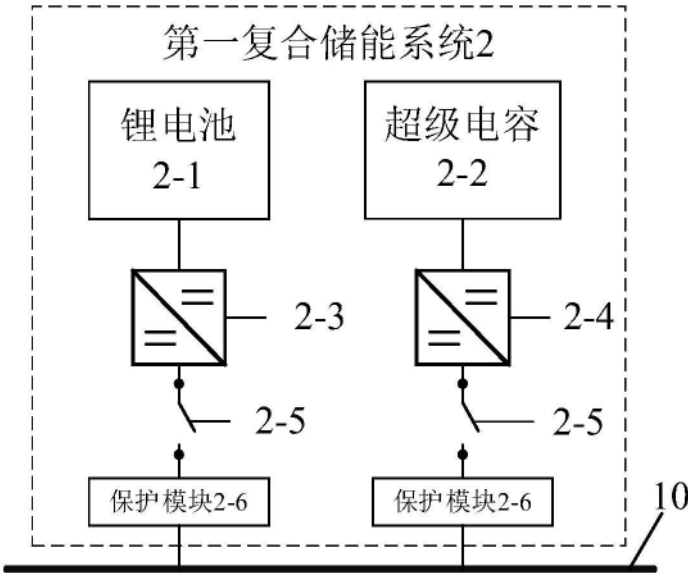


图3

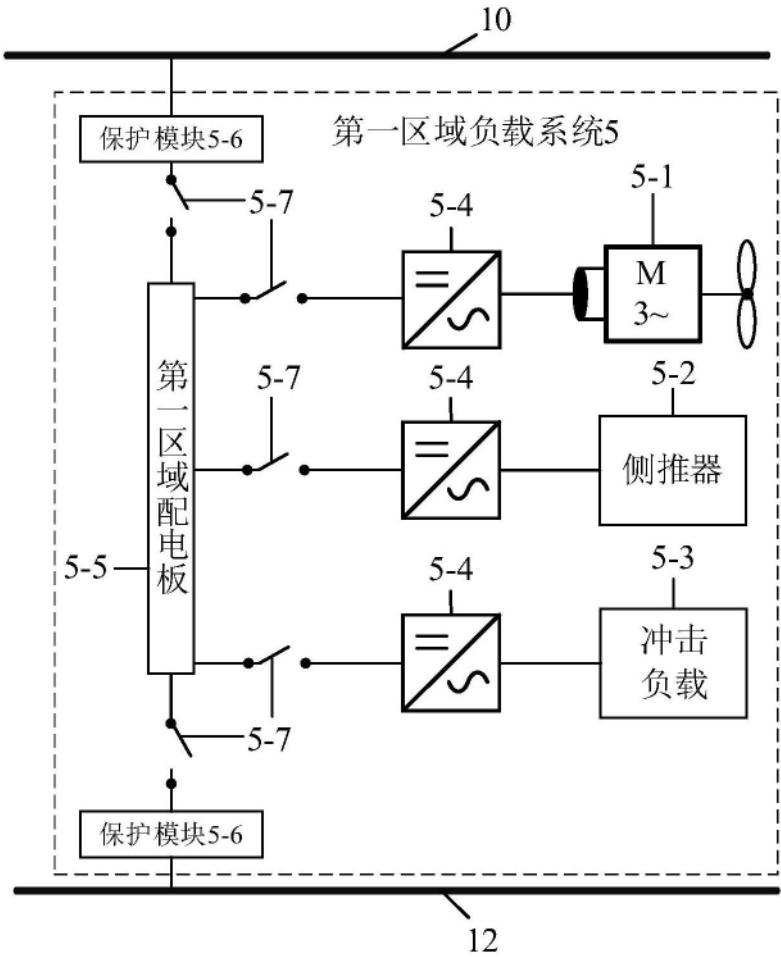


图4

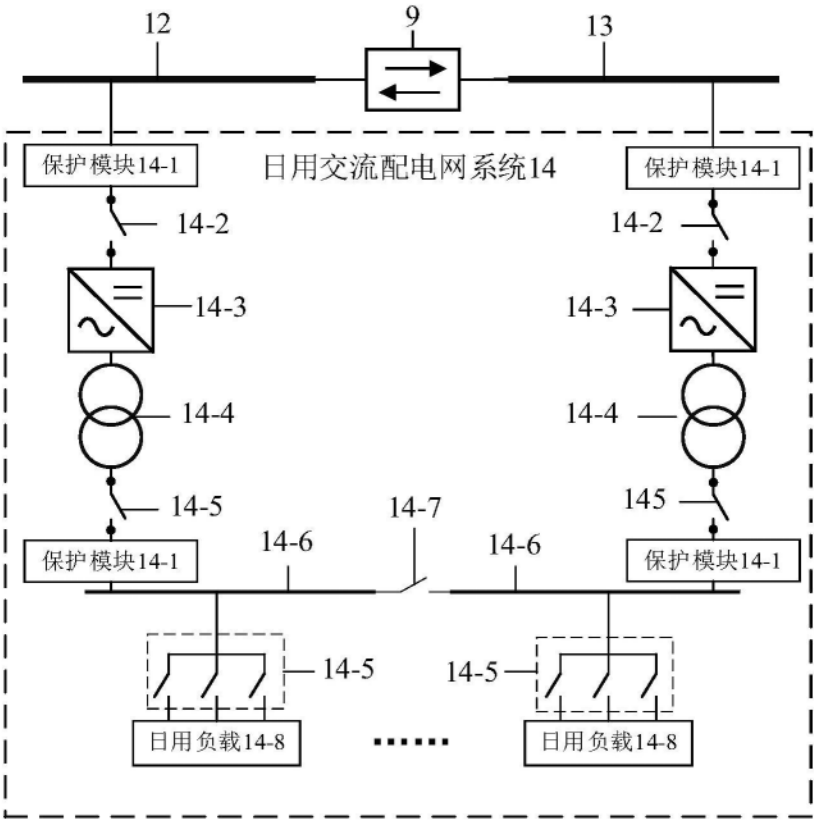


图5

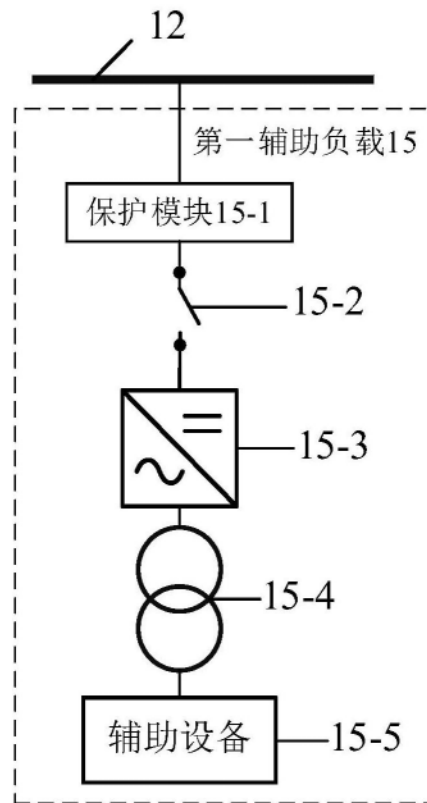


图6

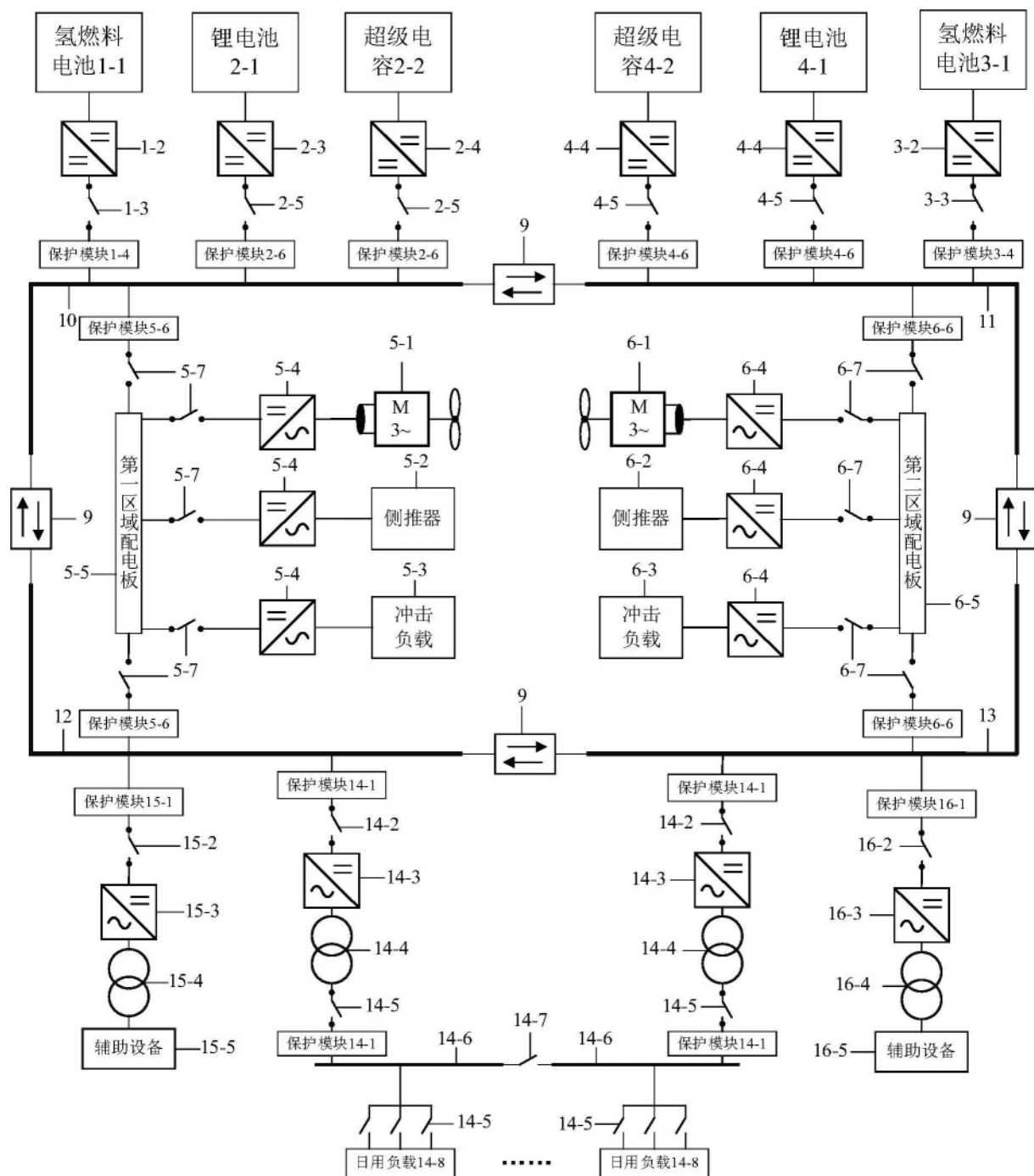


图7

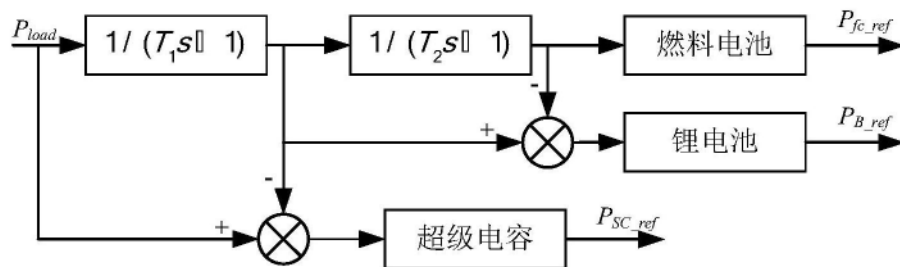


图8

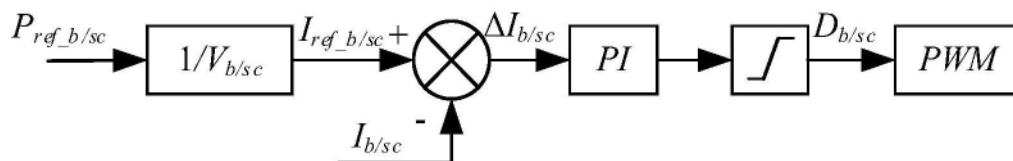


图9

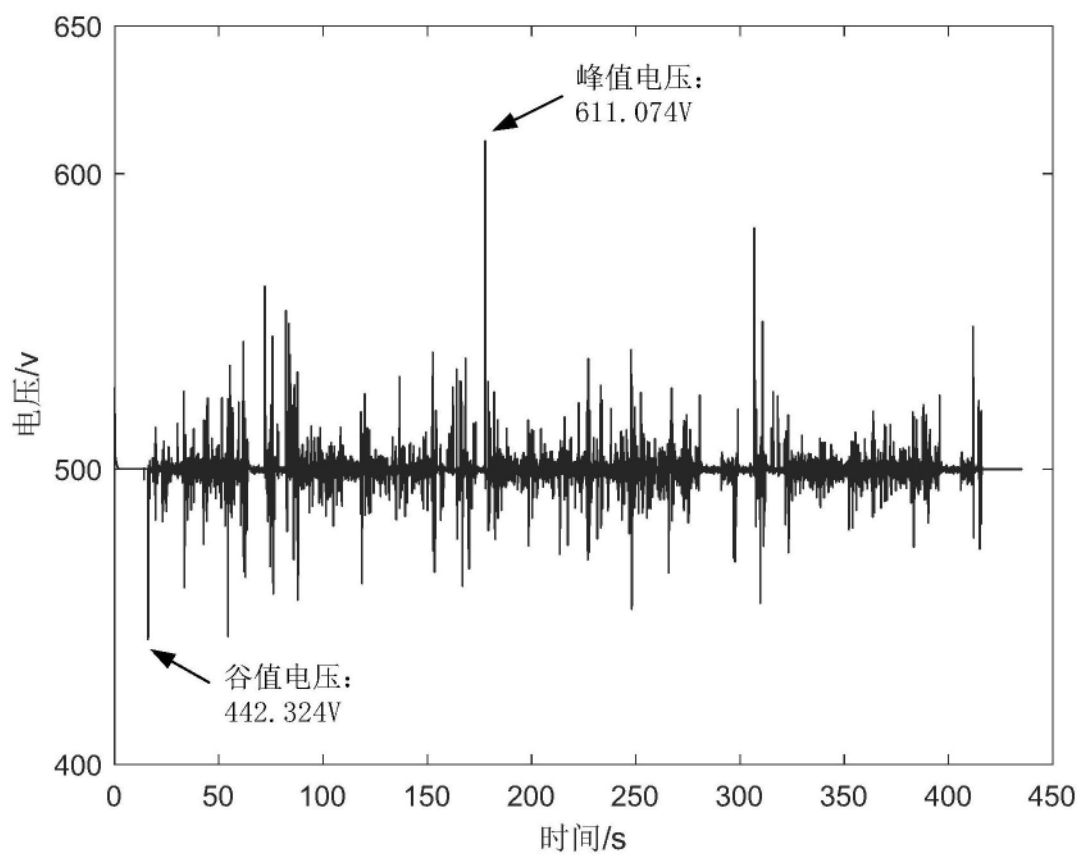


图10

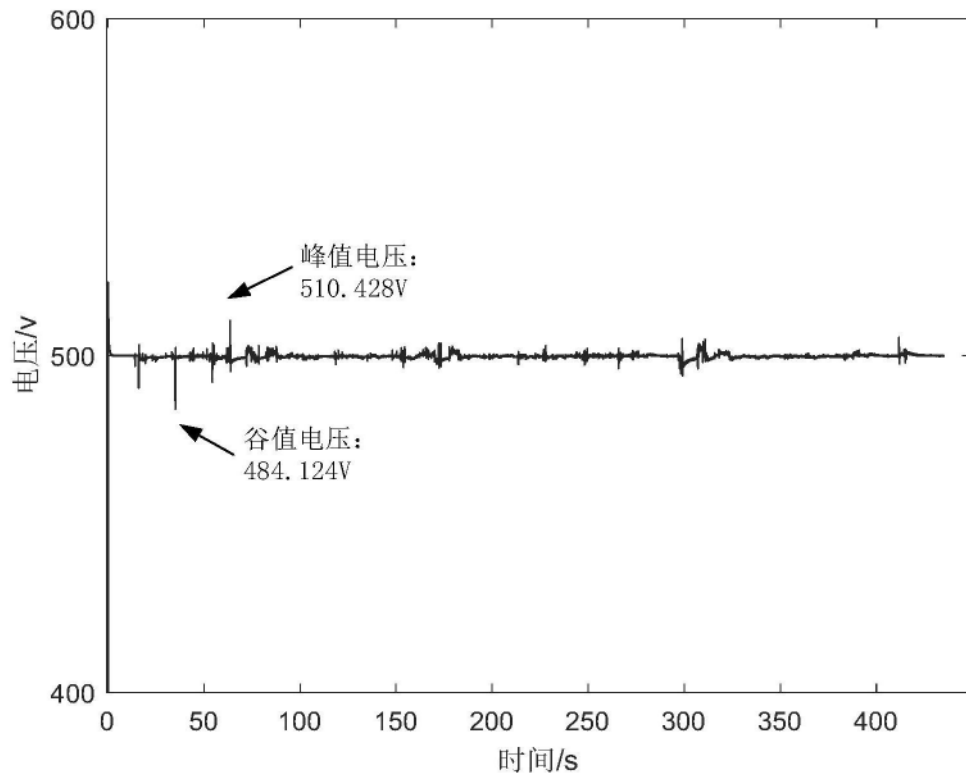


图11

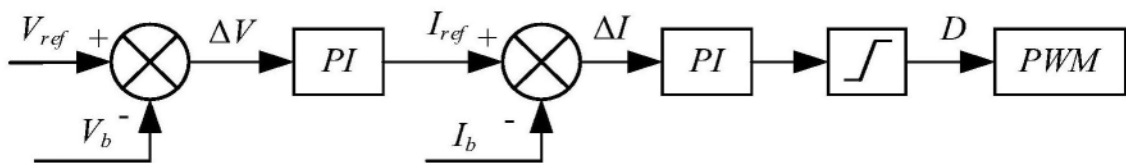


图12

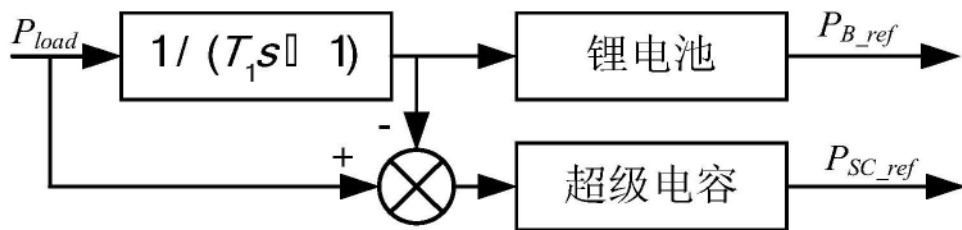


图13