

装甲车辆串联型混合动力方案设计与分析

魏曙光¹, 刘健¹, 可荣硕², 马海心¹, 李敏裕³

(1. 陆军装甲兵学院 兵器与控制系, 北京 100072;

2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100089; 3. 中国

洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 串联型混合动力在满足装甲车辆行驶驱动能力的同时, 为电武器、电防护等大功率用电设备提供了可靠的动力源。混合动力的多动力源结构匹配是提高车辆动力性及能量输出的关键。分析比较了发动机-发电机组、动力电池组和超级电容各自的输出结构方案及特点。结合装甲车辆的特殊需求, 提出了一种新型多动力源混合动力结构, 给出了该方案在不同工作模式下的基本能量管理分配方案, 并通过实验验证其可行性, 为串联型多动力源混合动力的结构设计提供了有效参考。

关键词: 自动控制技术; 混合动力; 装甲车辆; 能量管理; 多动力源

中图分类号: U463 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19262

Design and Analysis of Series Hybrid Power Schemes for Armed Vehicle

WEI Shuguang¹, LIU Jian¹, KE Rongshuo², MA Haixin¹, LI Minyu³

(1. Weaponary and Control Department, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072,

China; 2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100089, China; 3. Luoyang

Electronic Equipment Test Center, Luoyang 471003, Henan, China)

Abstract: Series hybrid power system not only meet the need of driving ability for armed vehicle, but also provide a reliable power for high power equipment like electrical weapons and electrical protection. Matching structure of multi-power source for hybrid is the key to improve the energy output and dynamic performance. The characteristics and output structure of engine-generator, power battery and super capacitor were analyzed. According to the special demand of the armored vehicles, a new multi-power source hybrid scheme was carried out, an energy management scheme of the proposed scheme was designed under different operation modes. The feasibility of the hybrid power scheme was validated by experiments, which provides an effective reference for the series hybrid power source.

Key words: automatic control technique; hybrid power; armed vehicle; energy management; multi-power source

电传动系统因其具有响应速度快, 动力性能优越, 系统布局的灵活性等特点, 成为未来军用装甲车辆研究的主要方向。而由于电池技术的限制, 混合动力系统还是目前电传动车辆的主要动力结构。混合动力由发动机-发电机组、动力电池组、超级电容, 以及燃料电池等能量源组成, 根据车辆的用途及运行工况特点, 选择合理的混合动力结构及匹配方案是提高车辆各项性能的关键。

军用装甲车辆在满足动力性及越野性的同

时, 还要考虑大功率用电设备及车辆特殊工作模式的电能需求, 因此一般采用串联式混合动力结构。文献[1]采用发动机-发电机组输出和动力电池直接并联方案, 通过调节发电机励磁来调节母线电压, 由于励磁能力有限, 无法在发动机全转速全范围内实现能量分配优化。文献[2]介绍一种动力电池带降压式DC/DC变换器结构, 通过提升母线电压方式对动力电池进行充电, 当车辆紧急制动时容易对动力电池造成损害。文献[3]介绍了一种动力电池带双向DC/DC变换器的结

基金项目: 武器装备预先研究项目(2013YY02)

作者简介: 魏曙光(1975-), 男, 博士, 副教授, Email: weishuguang1975@qq.com

通讯作者: 刘健(1992-), 男, 硕士研究生, Email: 2437853499@qq.com

构方式,能够对动力电池的充、放电进行控制,但是单一动力源无法满足装甲车辆运行中对峰值功率和能量的双重要求。文献[4]提出了一种超级电容带双向DC/DC的多动力源混合动力结构,提高了动力输出能力,这种方式要求变换器有足够的响应速度,同时容量需要满足超级电容最大输出功率。文献[5-6]讨论了几种采用动力电池组及超级电容复合储能结构方案,结合了动力电池组能量密度高及超级电容功率密度高的特点,提高了整体电能效率。

装甲车辆因其行驶环境的复杂性及特殊工作模式需求,其混合动力方案既要满足车辆的机动性、可靠性及能量回收等要求,同时在某些特殊工作环境下,需要关闭发动机行驶,以减少红外特性,提高隐蔽性能。本文首先对几种常用动力源匹配方案进行分析,结合车辆运行工况及特殊工作模式,设计了一种多动力源混合动力方案,并对其进行实验验证。

1 部件级方案设计

1.1 发动机-发电机组方案

在串联混合动力结构中,发动机作为车辆主动力源,通过发电机将机械能转化为电能,与储能单元共同为驱动电机提供能量,发动机-发电机组与驱动电机之间只有电的连接,没有机械上的约束,发动机转速与车速相对独立。基于装甲车辆对发动机-发电机组体积和容量的考虑,一般采用功率密度较高的永磁同步发电机^[7],输出三相交流电通过可控整流或不可控整流2种方式与电压母线连接,如图1所示。

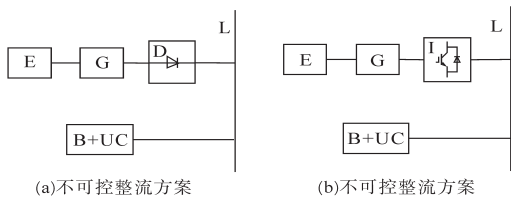


图1 发动机-发电机组结构方案

Fig.1 Output Schemes of engine-generator structure

图1中,E为发动机;G为发电机;D为三相不可控整流桥;I为可控整流器;B+UC为动力电池及超级电容混合储能单元;L为电压母线。

图1a中,整流桥直流侧母线电压关系为^[8]

$$U_i = K_d U_g = K_d (K_c \omega_g - I_g (R + j\omega_g L)) \quad (1)$$

$$\omega_g = \frac{2\pi p i_{cg} n_c}{60} \quad (2)$$

式中: U_i 为整流桥直流侧母线电压; K_d 为整流桥系数; U_g 为交流侧某相绕组端电压; $K_c \omega_g$ 为感应电动势; ω_g 为发电机角速度; I_g 为负载电流; R 为等效电阻; L 为等效电感; p 为极对数; i_{cg} 为传动比; n_c 为发动机转速。

该方案中 K_d 为常数,母线电压 U_i 与发电机交流侧电压 U_g 成线性关系,因此当发动机转速变换时,母线电压也随之变化,2种存在耦合关系。

第2种方案发电机输出接可控整流器,通过开关控制使输出直流母线电压保持在任意设定值,且与发动机转速无关,这种方式可以对发动机的输出功率及转速进行优化,使发动机保持在最佳工作点。但相比于第一种方式,整流器的开关过程增加了额外的损耗。这种方式下,需要发电机最大转速时输出电压满足下式:

$$U_i > 1.35 U_g \quad (3)$$

否则,由于IGBT反向二极管的作用使整流器工作在整流状态,输出电压不可控。

为减小电机铜耗及控制器开关损耗,母线电压值应该尽量高,受器件设计的耐压标准限制,整流后输出直流母线电压值一般在600~900V之间。

1.2 复合储能方案

储能单元在车辆制动过程中产生再生能量时,将能量储存起来,在适当时候将能量释放出来,为车辆提供瞬时功率,使发动机控制变得更灵活,从而提高整车运行效率。早期的储能单元采用动力电池作为单一能源,由于电池技术的限制,其无法满足车辆运行中对峰值功率和能量的双重要求。

采用动力电池与超级电容联合供电的方式,结合了动力电池高能量密度和超级电容的高功率密度的特点,使储能系统的负载适应能力有较大的提高,改善了系统的可靠性和经济性。图2为动力电池及超级电容的数学模型,其数学表达式如下:

$$i_b = \frac{E_b(SOC) - U_{c1} - U_b}{R_2} \quad (4)$$

$$U_{c1} = \frac{1}{C_1} \int_0^t (i_b - \frac{U_{c1}}{R_1}) dt + U_{c1}(t_0) \quad (5)$$

$$i_c = \frac{E_c}{R_3} + \frac{E_c - U_c}{R_4} \quad (6)$$

$$E_c = E(t_0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \quad (7)$$

式中: t_0 为未充电之前初始时刻。

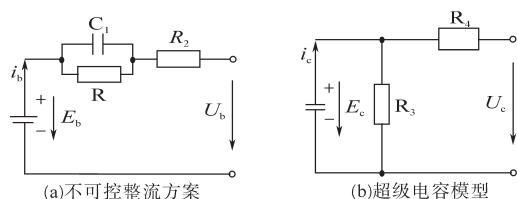


图2 动力电池及超级电容模型

Fig.2 The model of power battery and super capacitor

动力电池和超级电容组成的复合储能单元一般可以分为直接并联型、动力电池间接型和超级电容间接型,后2种方式都利用双向DC/DC变换器对2种能源进行功率分配。

考虑装甲车实际工作路况复杂,复合储能方案需要快速响应负载功率需求,充分发挥储能单元性能,实现能量高效利用,母线电压波动能及时稳定母线电压,能够吸收在急刹车、急转弯等路况下产生的电流尖峰,避免器件损坏,同时尽量减少车辆内部空间占用。

1.2.1 直接并联型

动力电池和超级电容直接并联输出,2者输出端电压 U_b 和 U_c 相等,即

$$U_b = U_c \quad (8)$$

忽略式(7)中第1项的电容初始电压,将式(4)、式(8)代入式(6)得到二者瞬时电流比,如下式所示:

$$\frac{i_c}{i_b} = \frac{R_3(E_c - U_{b0}) - R_3\Delta U_b}{R_4(E_b(SOC) - U_{c1} - U_{b0}) - R_4\Delta U_b} \quad (9)$$

$$U_b = U_{b0} + \Delta U_b \quad (10)$$

式中: U_{b0} 为初始时刻电池电压。

在负载变化的瞬间, E_c , U_{c1} 保持恒定,输出端电压产生变化量 ΔU_b 。将式(9)中分母、分子分别用二个部分表示,前半部分为稳态电流比,后半部分为动态电流比。可以看出动态电流比值为二者内阻比的倒数。超级电容能够提供的能量 Q 如下式所示:

$$Q = \frac{C}{2}(U_{bmax}^2 - U_{bmin}^2) \quad (11)$$

式中: U_{bmax} , U_{bmin} 分别为动力电池输出端电压最大值和最小值。设动力电池可允许的最大充、放电电流分别为 i_{bmin} , i_{bmax} , 动力电池工作电压极值如下式所示:

$$\begin{cases} U_{bmax} = E_b(SOC)_{max} - U_{c1} - i_{bmin}R_2 \\ U_{bmin} = E_b(SOC)_{min} - U_{c1} - i_{bmin}R_2 \end{cases} \quad (12)$$

端电压最大值在电池 SOC(荷电状态)为

100%,且处于最大充电电流时取得;最小值在电池 SOC最低,且处于最大放电电流时得到。

1.2.2 超级电容间接型

动力电池组连接到母线电压上,直接为负载提供电能,能量转化效率高,同时电压母线波动较小;超级电容经过双向DC/DC连接到电压母线,超级电容输出电压范围取决于双向DC/DC对低压侧输入电压的要求,相比于第1种方案更加灵活。在车辆加速、爬坡或制动时,能够有效地分配和回收能量。

1.2.3 动力电池间接型

超级电容直接并联到电压母线上,端电压即为母线电压,能够抑制母线电压波动,工作原理等同于低通滤波器。动力电池经过双向DC/DC与母线相连,可以根据动力电池 SOC 状态及整车运行状态对动力电池的充、放电电流进行控制。

利用 Matlab/Simulink 仿真软件对以上3种方案进行建模分析。根据动力电池及超级电容的充、放电数据进行拟合,计算出图2中模型的参数,并建立数学模型。双向DC/DC变换器采用 SimPowerSystems 中电气模型搭建。为模拟电压母线吸收和释放能量的过程,负载采用可控电流源代替,设计负载电流加载序列波形如图3所示。

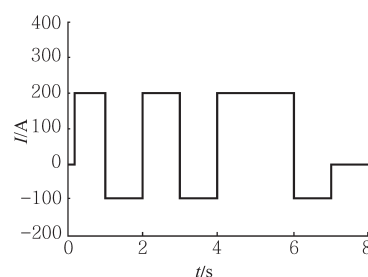


图3 负载电流波形

Fig.3 Current waveform of the load

图3中,负载电流正向最大值为200A,用以反映车辆加速或爬坡时负载状态;负向最大值为100A,用以反映车辆在制动或下坡时的能量回馈。前4s中负载电流交替变化,周期为1s。根据发动机设计方提供数据,发动机转速响应时间一般为1~3s,在负载突变初期能量全部由复合储能单元承担,因此仿真中仅对复合储能单元进行分析,仿真结果如图4所示。

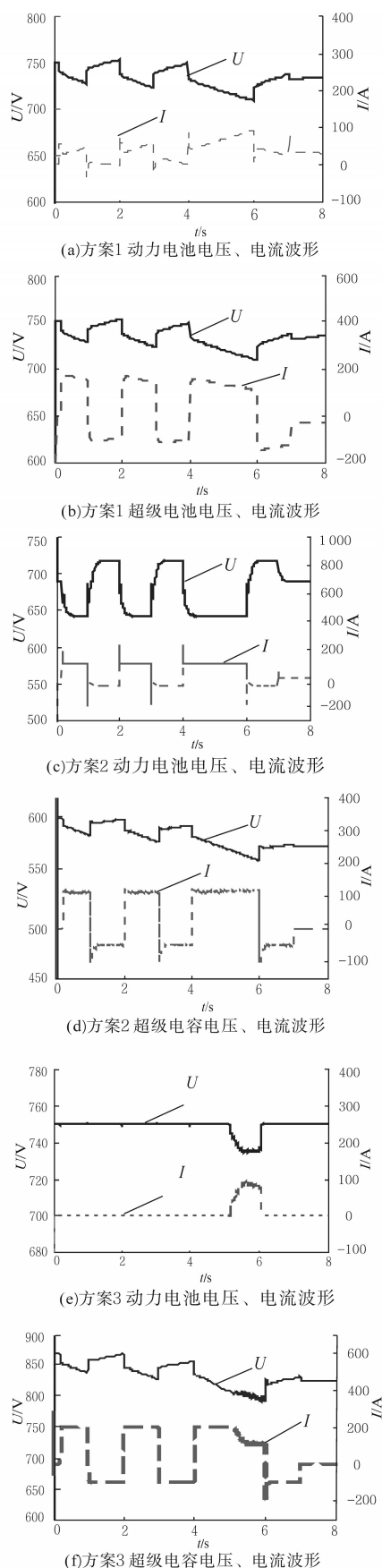


图4 3种方案的加载过程仿真波形

Fig.4 Simulation waveforms of loading process for 3 schemes

图4a、图4b为第1种方案实验波形,动力电池组端电压 U_b 等于超级电容端电压 U_c ,0.1 s时刻,突加负载瞬间,由于极化电容的作用,动力电池输出电流由60 A迅速降至40 A,并随母线电压变化率变缓,电流逐渐增加;超级电容输出电流从120 A迅速上升到160 A并逐渐下降,两者电流关系与式(9)相一致。1 s后,动力电池输出电流为-30 A,处于充电状态。在负载电流交替变化过程中,由于超级电容对母线电压有抑制作用,动力电池的电流并没有出现频繁充、放电的状态,与单一动力电池储能结构相比,动力电池的工作环境得到优化。这种方式车辆内部空间占用少,能量提供最直接,超级电容及电池能够迅速补偿电压母线的波动,反应迅速,但是由于两者的输出耦合在一起,能量分配由系统自身决定,使得超级电容的优势难以得到充分发挥^[9]。

第2种方案中,利用双向DC/DC对超级电容输出功率进行控制,使动力电池工作在额定电流范围内。由图4c、图4d可以看出,加载过程中,动力电池电流限制在-50~100 A之间(忽略尖峰电流),其余的负载功率由超级电容提供,超级电容输出补偿电流大于100 A,且随电压下降而增加,动力电池端电压即为母线电压,整个过程中母线电压变化范围在640~710 V之间。加载及制动瞬间,动力电池产生尖峰电流,这是由于双向DC/DC控制响应滞后性造成。要求变换器的响应速度非常快,否则频繁的冲击电流会对动力电池的寿命造成影响,同时变换器要承受超级电容的全部功率,增加了装置的体积及损耗。这种方式适用于车辆运行速度变化较缓,且行驶路况较好的情况,是目前纯电动车辆讨论和研究最广泛的混合储能方式^[10],而对于装甲车辆行驶路况复杂,动力电池容易产生尖峰电流,变换器体积和损耗增加,不适用与此类方案。

第3种方案中,在负载波动阶段,动力电池组电流始终为0 A,超级电容承担全部负载电流,5 s后超级电容电压下降到800 V,DC/DC开始工作于恒压输出模式,动力电池达到输出电流上限后,DC/DC进入限流输出模式。当超级电容电压下降到与动力电池电压一致时,两者将并联输出。这种方式的特点是:双向DC/DC对动力电池充、放电进行控制,对电池起到保护作用。当母线电压在正常工作范围内变化时,超级电容能够迅速吸收母线上的大部分电流,这使得DC/DC的

容量及相应速度需求大大减小,提高系统可靠性。这种方式适用于车辆行驶路面环境复杂,负载功率及车速瞬时变化较大、对电压母线的品质

要求不高的情况,适用于装甲车辆复合储能。表1对3种方案中动力电池和超级电容的工作范围及特性进行比较。

表1 3种方案中动力电池及超级电容工作范围

Tab.1 Operating range of battery and ultracapacitor in three schemes

	方案1		方案2		方案3	
	动力电池组	超级电容	动力电池组	超级电容	动力电池组	超级电容
最大输入、输出功率	自身充、放电电流范围	动力电池工作电流范围	自身充、放电电流范围	DC/DC最大工作电流范围	DC/DC控制	自身充、放电电流范围
最大吸收、释放能量	-	动力电池工作电压范围	-	DC/DC低压侧工作电压范围	-	母线电压工作范围
双向DC/DC	-		响应要求快,容量需求大,损耗大		响应要求慢,容量需求小,损耗小	
母线电压	受动力电池电压限制		受动力电池电压限制		由负载决定	

2 整体方案分析

2.1 整体方案设计

混合动力结构的设计与装甲车辆类型以及工作特点有关。考虑到所研究装甲车辆对机动性、越野性能、特殊环境下的隐蔽行驶能力等因素的要求,本文设计了一种多动力源的混合动力结构,其动力电池间接连接方案如图5所示。发动机-发电机组采用1.1节所述的间接连接方案,复合储能单元由动力电池及超级电容构成,采用1.2节所述第3种连接方案。

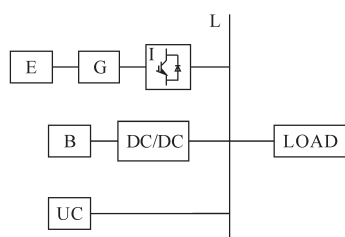


图5 动力电池间接连接方案图

Fig.5 The scheme diagram of the battery indirect connection

发动机-发电机组作为车辆主动力源,提供车辆行驶所需的基本功率,发电机输出电压不受母线电压限制,可以根据不同的功率需求,确定发动机最佳的工作转速点。动力电池要满足在关闭发动机“静默行驶”模式下,车辆正常运行所需的动力性及行驶里程需求,同时,在车辆加速或爬坡过程中,发动机输出功率不足时,动力电池能够提供持续及瞬时功率,并且在车辆制动或下坡时,对回馈能量进行吸收。超级电容能够对突然变化的负载功率作出快速响应,提供较大的瞬时功率,抑制母线电压波动,其输出直接与电压母线相连,避免了大电流在功率变换装置上引起的器件损耗。双向DC/DC变换器采用升、降压

拓扑结构,考虑到减小动力损耗及车内布线体积,将超级电容,即电压母线位于变换器高压侧,动力电池位于低压侧。这种结构方式下,当负载功率增加导致母线电压跌落至低于动力电池电压时,变换器通过反并联二极管使动力电池自动投切到电压母线进行并联输出,维持母线电压值。

发动机-发电机组采用功率给定方式,其输出目标功率由负载需求功率及动力电池SOC决定;动力电池采用电压给定方式,通过DC/DC变换器对母线电压进行稳压控制,其目标电压由车辆运行状态及下一时刻功率需求预测决定。

由于发动机转速响应较慢,为保证车辆的机动性,在负载变化的前几秒,负载驱动功率主要由动力电池及超级电容提供。随着发动机的转速上升,输出功率增加,当系统稳定后,负载所需功率主要由发动机及动力电池提供。本文从能量分配的暂态过程和稳态过程对该混合动力结构进行分析。如图6、图7分别为混合动力系统在负载需求功率变化的暂态及稳态过程中,动力源能量的分配过程。

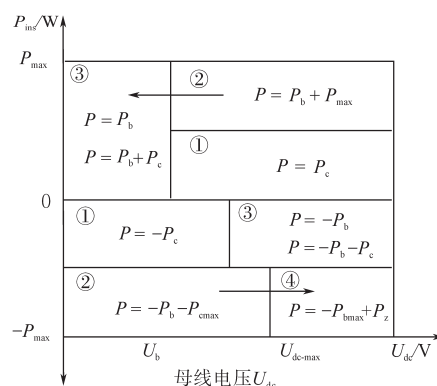


图6 暂态需求功率分配图

Fig.6 Distribution diagram of instantaneous power demanded

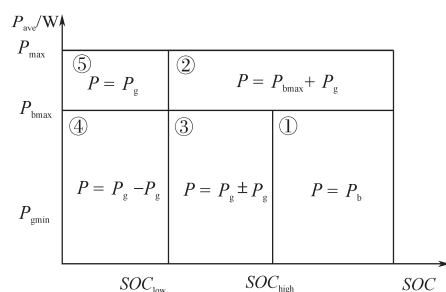


图7 稳态平均需求功率分配图

Fig.7 Distribution diagram of steady power demand

图6、图7中， P_{ins} 为负载所需瞬时功率需求； P_{ave} 为车辆稳定运行过程中的平均功率需求； P_b 为电池功率； P_c 为超级电容功率； P_z 为制动电阻能耗功率； P_g 为发动机输出功率。其中“-”表示为充电储能过程。

假设在功率瞬时变化过程中，动力电池的SOC保持在理想工作范围内，此时以暂态需求功率 P_{ins} 和母线电压 U_{dc} 为参考依据，将能量分配划分为7个区域：

1)母线电压即超级电容端电压处于正常范围内时，瞬时的功率由超级电容进行补偿；2)瞬时功率超过超级电容的极限电流时，超级电容处于最大功率输出模式，由动力电池和超级电容共同承担；3)超级电容吸收或释放能量使母线电压接近设定的边界值时，由动力电池和超级电容联合输出，母线电压到达并保持在临界值后，超级电容不再吸收或释放能量，此时需求功率由动力

电池独自承担；4)母线电压超过最大允许工作电压时，采用动力电池和制动电阻联合吸收方式。

在系统稳态过程中，发动机及动力电池输出功率趋于稳定，母线电压趋于平稳，超级电容仅提供较小的能量以稳定母线电压。忽略超级电容的功率输出，以负载平均需求功率以及动力电池的SOC为参考，将能量分配划分为5个区域：

1)当动力电池SOC高于设定值时，由动力电池独立工作；2)当需求功率较高时，由发动机和动力电池共同提供，动力电池处于最大输出功率点；3)当动力电池SOC处于设定值之间时，发动机的输出功率为负载需求功率与动力电池目标功率之和；4)当动力电池SOC较低时，发动机在提供负载需求功率的同时，给动力电池进行充电。5)发动机为满足车辆动力性，优先提供车辆所需的驱动功率。

从图6、图7可以看出，动力电池只有在车辆持续大功率或紧急制动过程中的电流较大，DC/DC变换器的平均能量转化率高。

2.2 试验分析

对以上结构进行试验分析，由于实验条件的限制，并没有连接发动机-发电机组，这里采用2组可调直流电源来模拟发动机-发电机组及车辆制动时的回馈能量；用高压直流电阻箱代替实际驱动电机负载。动力电池采用锂离子电池，超级电容及双向DC/DC变换器的参数如表2所示。

表2 动力电池、超级电容及DC/DC参数

Tab.2 Parameters of battery, ultracapacitor and DC/DC converters

名称	容量	单体模块		串联数量	并联数量	工作电压/V		工作电流/A
		电压/V	内阻/mΩ			低压	高压	
动力电池组	50 A·h	4.2	2.68	192	2	750		-100 ~ 300
超级电容	150 F	48	4.2	17	1	816		-500 ~ 500
双向DC/DC	-	-	-	-	1	650 ~ 750	650 ~ 867	-300 ~ 300
电源	12 kW	600	-	2	1	1 000		15
电阻箱	100 kW	800	6 400	1	1	800		125

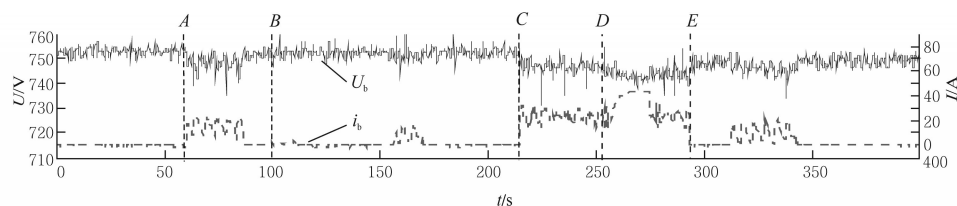
实验条件：动力电池组为192块单体4.2 V电池串联，2组并联，设置SOC为80%处于高效工作区，开路电压750 V。超级电容直接挂接母线，由17块单体串联，设置初始电压800 V，考虑超级电容对吸收和释放能量应留有余量，母线电压预期值设定在780 V。2组12 kW直流电源以最大工作电流输出，电阻箱工作电压800 V以匹配母线电压，母线负载最大功率范围-12 ~ 88 kW。

对该系统进行加载实验，波形图如图8所

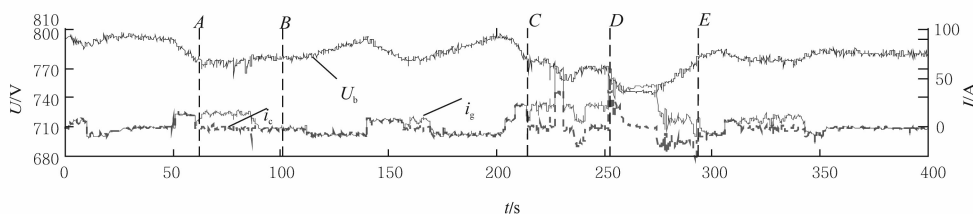
示，输出功率数值上=稳态功率+暂态功率。在B—C阶段，此时母线电压高于780 V，主要由超级电容来补偿负载功率，DC/DC没有参与工作，动力电池SOC在合理范围内，无需对其进行充电，处于暂态功率分配状态①，状态②，以及稳态功率分配①（见图6、图7）。在A—B阶段中，当母线电压下降到设定值时，DC/DC进入稳压模式，由动力电池提供负载功率，处于稳态功率分配状态①。C—D阶段为稳压模式，负载功率

变化较大使母线电压产生波动,超级电容对负载功率进行补偿,与动力电池共同提供输出功率,处于稳态功率分配状态②; $D-E$ 阶段,当动力电池不足以提供全部负载功率时,母线电压逐渐下降,直到动力电池与超级电容通过DC/DC的反并联

二极管并联输出,处于稳态功率分配状态③。混合动力系统加载时,动力电池与超级电容的动态响应满足功率分配策略,母线电压值在工作范围内并不恒定,这种方式使超级电容的容量得到充分的利用。



(a)动力电池电压、电流波形



(b)超级电容电压、电流波形

图8 新型混合动力系统加载波形

Fig.8 Loading waveform of new hybrid power system

3 结论

本文针对某型装甲车辆动力需求及运行特点,设计了一种多动力源混合动力结构,对比其他混合动力结构,具有如下特点:

1)发动机独立控制,发电机输出电压不受母线电压限制,可以根据不同的功率需求,确定最佳的工作转速点。

2)动力电池只有在车辆持续大功率或紧急制动过程中的电流较大,DC/DC变换器的平均能量转化率高。

3)超级电容采用被动补偿方式,响应速度快,直接与负载相连,避免了大电流在功率变换装置上引起的器件损耗。

4)母线电压目标值可以根据车辆运行状态及动力电池SOC等因素进行动态调节,充分发挥超级电容的容量。

参考文献

- [1] 臧克茂. 陆战平台全电化技术研究综述[J]. 装甲兵工程学院院报, 2011, 25(1): 1-7.
- [2] 项宇, 刘春光, 庞宾宾. 混合动力装甲车辆能量管理策略实时仿真[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(7): 133-138.
- [3] 王成, 郭淑英, 刘凌. 串联式混合动力系统在公交客车中的

开发与应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 18-24.

- [4] 赵秀春, 郭戈. 混合动力电动汽车能量管理策略研究综述[J]. 自动化学报, 2016, 3(42): 321-334.
- [5] Wirasingha Sanjaka G, Emadi Ali. Classification and Review of Control Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 111-122.
- [6] Shuai Liu, Corzine Keith A, Mehdi Ferdowsi. A New Battery/Ultracapacitor Energy Storage System Design and Its Motor Drive Intergration for Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 1516-1523.
- [7] 阳贵兵, 廖自力, 马晓军. 多轮独立电驱车辆驱动力优化控制研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(1): 23-30.
- [8] 孙逢春, 张承宁. 装甲车辆混合动力电传动技术[M]. 国防工业出版社, 2008: 190-202.
- [9] Jian Cao, Ali Emadi. A New Battery Ultra-capacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 122-132.
- [10] Omar N, Mierlo J V, Verbrugge B, et al. Power and Life Enhancement of Battery-electrical Double Layer Capacitor for Hybrid Electric and Charge-depleting Plug-in Vehicle Applications[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(25): 7524-7531.

收稿日期: 2018-07-05

修改稿日期: 2018-08-27