

DOI: 10.7652/xjtuxb201512021

电动汽车的多模式复合电源 能量管理自适应优化

王斌, 徐俊, 曹秉刚, 李其玉, 杨晴霞, 宁博
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为提高电动汽车的多模式复合电源系统效率,提出一种能量管理自适应优化方法。对多模式复合电源工作模式进行分析,设计超级电容自适应参考电压。建立复合电源系统效率优化目标函数,并结合电池荷电状态和超级电容电压设计电池输出功率补偿规则和能量管理自适应优化方法。搭建多模式复合电源系统仿真模型和测试平台进行测试。测试结果表明:在 UDDS 和 NEDC 路况下,与滞环控制相比,采用能量管理自适应优化的多模式复合电源系统效率分别提高 1.13% 和 1.02%。采用能量管理自适应优化的多模式复合电源不仅能自适应选择工作模式和完成电池输出功率补偿,而且避免了电池输出功率突然增大,保证了电池安全。

关键词: 电动汽车;复合电源系统;能量管理;自适应优化

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)12-0130-07

Adaptive Optimization of Energy Management Strategy for a Multi-Mode Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles

WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, LI Qiyu, YANG Qingxia, NING Bo
(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An adaptive optimization method (ADM) for energy management strategy is proposed to improve the efficiency of the multi-mode hybrid energy storage system (HESS) in electric vehicles. The operating modes of the multi-mode HESS are first analyzed, and an adaptive reference voltage of the ultracapacitor (UC) is defined. The objective of optimization focuses on the efficiency of the overall system. And the compensation rules of the battery power output and the ADM for energy management strategy are designed by combining the battery state of charge (SOC) and the UC voltage. A simulation model and an experimental platform are then established. Compared with the multi-mode HESS with the hysteresis control strategy in the UDDS and the NEDC drive cycles show that the ADM improves the overall system efficiency of the multi-mode HESS up to 1.13% and 1.02%, respectively. The multi-mode HESS with the ADM for energy management strategy can not only achieve the adaptive selection of operating modes and the compensation of the battery power output, but also avoid the excessive power output of the battery, so the battery safety is ensured.

Keywords: electric vehicle; hybrid energy storage system; energy management; adaptive optimization

随着节能减排、低碳出行意识深入人心,电动汽车的研发和推广受到世界各国的重视。目前,电动汽车的发展瓶颈依旧是电池能量管理系统^[1]。尽管采用多组电池串并联能满足电动汽车的峰值功率要求,但电池串联内阻增大、均衡难度增加、使用寿命缩短等问题突出^[1-3]。超级电容内阻小、功率密度高,与电池组成复合电源能显著降低电池组均衡难度和延长电池组使用寿命^[4]。

复合电源包含电池组/超级电容(battery/ultracapacitor, Bat/UC)结构^[5]、UC/Bat 结构^[6]和复合式结构^[7-9]。复合式结构的复合电源具有多种工作模式,是一种多模式复合电源。多模式复合电源根据电动汽车的运行条件选择最合理的工作模式,能显著提高系统工作效率^[1,7-8]。由于工作模式的多样性,需结合汽车运行条件设计合理的能量管理策略,发挥多模式复合电源的优势。

目前,UC/Bat 和 Bat/UC 结构的复合电源能量管理策略已十分成熟,包括基于模式分类的模式切换控制策略^[10]、滞环控制策略^[4,7]、功率平衡控制策略^[11]、模糊控制策略^[12]等。基于模式分类的模式切换控制、滞环控制、功率平衡控制策略易实现,但是系统整体效率有待优化。模糊控制策略作为智能控制的分支,已被用于 UC/Bat 和 Bat/UC 结构的复合电源能量管理策略优化^[12-14]。然而,多模式复合电源在多种工作模式间切换时,系统控制参数发生大范围跳变,使工作模式寻优、参数优化更加复杂,仅采用模糊控制策略不完全适合多种工作模式切换的复合电源能量管理系统优化。

自适应控制在系统工作模式发生变化时,通过自适应修正控制参数,能保证系统工作在最优或次优状态^[15-16],因此自适应控制非常适合具备多种工作模式切换的复合电源能量管理优化。本文根据多模式复合电源的工作模式特点建立超级电容自适应参考电压和复合电源系统效率优化目标函数,并结合电池荷电状态(state of charge, SOC)和超级电容自适应参考电压设计电池输出功率补偿规则和能量管理自适应优化方法,实现多模式复合电源的能量管理优化。

1 多模式复合电源结构和工作模式

多模式复合电源结构如图 1 所示。电池组电压低于超级电容电压,单向二极管避免电池组在制动时被直接频繁充电,因此该结构能延长电池使用寿命^[4-5]。切换开关用于工作模式的择优选择。直流-直流变换器(direct current-direct current, DC-DC)

对电池组升压,超级电容侧高压能减少负载侧稳压电路的能量损耗。为克服模式切换时的电压波动,复合电源输出端有稳压电路(voltage stabilizing circuit, VSC)。

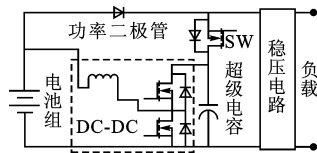
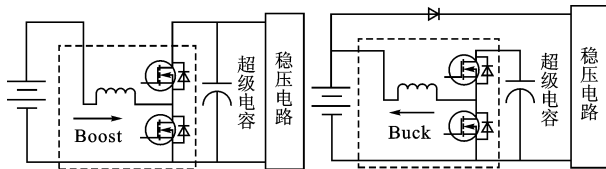


图 1 多模式复合电源结构

多模式复合电源结构兼备 UC/Bat 和 Bat/UC 结构功能,通过控制切换开关和 DC-DC 高效率工作。在大功率工作时,切换开关导通采用 Bat/UC 结构工作,DC-DC 必须升压工作,此时超级电容提供峰值功率,电池组提供恒定功率。在小功率工作时,切换开关截止采用 UC/Bat 结构工作,DC-DC 必须降压工作,此时电池组直接向负载供能,减少电池组能量损失。切换开关导通和截止的工作模式如图 2 所示。



(a) 切换开关导通 (Bat/UC) (b) 切换开关截止 (UC/Bat)

图 2 切换开关导通和截止的复合电源工作模式

多模式复合电源有 4 种输出工作模式:超级电容单独输出模式、Bat/UC 工作模式、电池组单独输出模式、UC/Bat 工作模式。制动时有两种工作模式:超级电容单独回收模式和共同回收模式。

多模式复合电源采用滞环控制策略^[7]时,超级电容电压高于滞环上限值,选择超级电容单独输出模式;大功率输出且超级电容电压低于滞环下限值时,选择 Bat/UC 工作模式;电池电量充足且小功率输出时,选择电池组单独输出模式。UC/Bat 工作模式仅在电池电量不足时使用;制动时优先选择超级电容单独回收模式,仅在超级电容电压高于滞环上限值时采用共同回收模式。尽管滞环控制策略简单,但是不具备工作模式寻优、效率优化和超级电容参考电压自适应调整功能。为此,本文将结合超级电容自适应参考电压设计能量管理自适应优化方法。

2 能量管理自适应优化

2.1 超级电容自适应参考电压

多模式复合电源能量管理的优化目标是系统的

工作效率最优,同时应根据超级电容的参考电压提前进行功率补偿控制,最大限度发挥超级电容“滤波”功能,保证系统有效工作。图3给出能量管理优化方案。由于超级电容直接并联在输出端,实现自适应滤波,减少了滤波控制算法的复杂性,但是必须设计合适的超级电容自适应参考电压,结合电池输出功率补偿,使超级电容在参考电压附近工作,避免超级电容在大功率工作时电量不足或小功率工作时电量过高。通过工作模式寻优和效率优化,实现多模式复合电源的能量管理自适应优化。

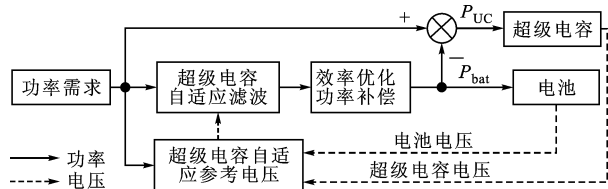


图3 能量管理优化方案

电动汽车在行驶时,超级电容参考电压根据运行条件自适应调整。将运行条件等效为需求功率,当需求功率小时,超级电容参考电压自适应增大,超级电容可提供电量或功率减小,因此多模式复合电源在小功率工作时主要由电池组提供功率;当需求功率很大时,超级电容参考电压减小,当前电压与参考电压差增大,即超级电容可提供电量或功率增加,此时超级电容提供峰值功率,电池输出优化功率。超级电容自适应参考电压为

$$\left. \begin{aligned} & \frac{P_{\text{dem}} - P_{\text{bat}}^{\text{opt}}}{P_{\text{dem}} - P_{\text{bat}}^{\text{up}}} (V_{\text{UC}}^{\text{low}} - V_{\text{UC}}^{\text{tar}}) + V_{\text{UC}}^{\text{tar}} = V_{\text{UC}}^{\text{ref}}, P_{\text{dem}} \geq P_{\text{bat}}^{\text{opt}} \\ & \max[V_{\text{UC}}^{\text{tar}}, V_{\text{UC}}] = V_{\text{UC}}^{\text{ref}}, 0 < P_{\text{dem}} < P_{\text{bat}}^{\text{opt}}, V_{\text{UC}} \leq V_{\text{UC}}^{\text{up}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{UC}}^{\text{ref}}$ 是超级电容自适应参考电压; P_{dem} 是需求功率; $P_{\text{bat}}^{\text{opt}}$ 是 Bat/UC 工作模式时电池组的优化输出功率; $P_{\text{bat}}^{\text{up}}$ 是需求功率上限值; $V_{\text{UC}}^{\text{low}}$ 是超级电容电压下限值; $V_{\text{UC}}^{\text{up}}$ 是超级电容电压上限值; $V_{\text{UC}}^{\text{tar}}$ 是超级电容目标电压,由电池电压决定。

为提高系统效率,超级电容目标电压 $V_{\text{UC}}^{\text{tar}}$ 满足:当 $P_{\text{dem}} \geq P_{\text{bat}}^{\text{opt}}$,采用 Bat/UC 工作模式的系统效率大于或等于电池组单独输出模式的系统效率,有

$$V_{\text{UC}}^{\text{tar}} = \eta_{\text{sys}}(V_{\text{bat}}) \quad (2)$$

式中: $\eta_{\text{sys}}(V_{\text{bat}})$ 表示在电池电压为 V_{bat} 、采用电池组单独输出模式与采用 Bat/UC 工作模式的系统效率相等时对应的超级电容电压。

2.2 能量管理策略及优化

超级电容自适应滤波避免了瞬时变化的需求功率对电池组的冲击。为实现系统效率优化,系统最

优效率等效为能量消耗最小,优化目标函数为

$$J_T = \min \sum_{t=1}^T \{P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{UC}}(t)\} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{bat}}(t)$ 、 $P_{\text{UC}}(t)$ 分别为电池组和超级电容在 t 时刻的输出功率。

效率优化需建立各部件效率模型。超级电容内阻小,损耗可忽略,工作效率近似为 100%。电池的工作效率 η_{bat} 根据开路电压-内阻模型计算^[17],有

$$\eta_{\text{bat}} = 1 - P_{\text{bat}} R_{\text{bat}} / (V_{\text{bat}} E_{\text{bat}}) \quad (4)$$

式中: E_{bat} 是电池的开路电压; R_{bat} 是电池的内阻。

分别采用多组输入和输出功率实验,其效率等于输出功率除以输入功率。测试用 DC-DC 额定功率为 100 W,由于降压模式使用较少,主要测试升压模式效率。为达到所需功率,假设采用多个 DC-DC 并联,忽略 DC-DC 并联对效率的影响,采用插值法得到 DC-DC 效率曲线,如图4所示。

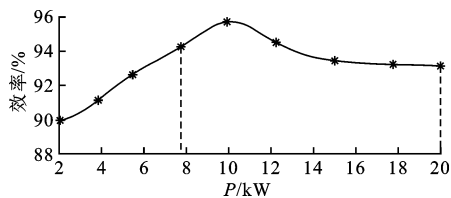


图4 DC-DC效率曲线

稳压电路 VSC 的功能是向负载提供稳定电压,其效率与输入电压 V_{in} 、输出功率 P_{out} 相关,有

$$\eta_{\text{VSC}} = f_{\text{VSC}}(V_{\text{in}}, P_{\text{out}}) \quad (5)$$

目标函数受超级电容电压和电池 SOC 约束。超级电容电压和电池 SOC 计算公式^[1]如下。

$$V_{\text{UC}}(t+1) = V_{\text{UC}}(t) - I_{\text{UC}}(t)/C_{\text{UC}}(t) \quad (6)$$

式中: $V_{\text{UC}}(t+1)$ 是超级电容下一时刻电压; $V_{\text{UC}}(t)$ 、 $I_{\text{UC}}(t)$ 和 $C_{\text{UC}}(t)$ 是超级电容当前电压、电流和容量。

$$S_{\text{bat}} = S_{\text{bat}}^{\text{initial}} - \left[\eta \int_0^t I_{\text{bat}}(t) dt \right] / C_t \quad (7)$$

式中: S_{bat} 表示电池当前 SOC; $S_{\text{bat}}^{\text{initial}}$ 表示电池初始 SOC; $I_{\text{bat}}(t)$ 是电池工作电流; C_t 是电池容量; η 是充放电效率。

当电池 $S_{\text{bat}} > 0.1$,且超级电容电压不等于自适应参考电压时,采用 Bat/UC 工作模式进行电池输出功率补偿,使超级电容电压趋向于参考电压。有

$$\left. \begin{aligned} & (P_{\text{bat}}^{\text{low}} - P_{\text{bat}}^{\text{opt}}) \frac{(V_{\text{UC}} - V_{\text{UC}}^{\text{ref}})}{(V_{\text{UC}}^{\text{up}} - V_{\text{UC}}^{\text{ref}})} + P_{\text{bat}}^{\text{opt}} = P_{\text{bat}}, V_{\text{UC}} > V_{\text{UC}}^{\text{ref}} \\ & (P_{\text{bat}}^{\text{max}} - P_{\text{bat}}^{\text{opt}}) \frac{(V_{\text{UC}} - V_{\text{UC}}^{\text{ref}})}{(V_{\text{UC}}^{\text{low}} - V_{\text{UC}}^{\text{ref}})} + P_{\text{bat}}^{\text{opt}} = P_{\text{bat}}, V_{\text{UC}} < V_{\text{UC}}^{\text{ref}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: P_{bat} 是电池输入或输出功率, $P_{\text{bat}}^{\text{low}}$ 、 $P_{\text{bat}}^{\text{max}}$ 分别为

电池组在 Bat/UC 工作模式的输出功率下限值和上限值。

当电池 $S_{\text{bat}} > 0.1$ 且超级电容电压等于自适应参考电压时,不进行功率补偿,需要对 Bat/UC 工作模式或纯电池组输出模式进行寻优选择,在电池组单独输出模式时,约束条件为

$$P_{\text{dem}} = P_{\text{bat}} \eta_{\text{bat}}^{\text{model1}} \eta_{\text{VSC}}^{\text{model1}} \quad (9)$$

式中: model1 为电池组单独输出模式。

在 Bat/UC 工作模式时,约束条件为

$$P_{\text{dem}} = (P_{\text{bat}} \eta_{\text{bat}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}} + P_{\text{UC}}) \eta_{\text{VSC}}^{\text{mode2}} \quad (10)$$

式中: $\eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}}$ 为 DC-DC 效率。mode2 为 Bat/UC 工作模式。

令 $P_{\text{UC}} = P'_{\text{bat}} \eta_{\text{bat}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}}$, P'_{bat} 表示超级电容不工作时电池组需要提供的额外功率,有

$$P_{\text{dem}} = (P_{\text{bat}} \eta_{\text{bat}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}} + P'_{\text{bat}} \eta_{\text{bat}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}}) \eta_{\text{VSC}}^{\text{mode2}} \quad (11)$$

为使目标函数最优,有

$$J_T = \arg \min_{\{\text{model1}, \text{mode2}\}} \left\{ \frac{P_{\text{dem}}}{\eta_{\text{bat}}^{\text{model1}} \eta_{\text{VSC}}^{\text{model1}}}, \frac{P_{\text{dem}}}{\eta_{\text{bat}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{VSC}}^{\text{mode2}}} \right\} \quad (12)$$

根据式(12)进行工作模式自适应寻优:当式(12)第一项的值小于第二项时,采用纯电池组输出模式,否则采用 Bat/UC 工作模式。Bat/UC 工作模式时电池输出优化功率为 $P_{\text{bat}}^{\text{opt}}$ 。

$P_{\text{bat}}^{\text{low}}$ 、 $P_{\text{bat}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{bat}}^{\text{opt}}$ 的选择对优化结果至关重要,结合图 4 的 DC-DC 的效率曲线, $P_{\text{bat}}^{\text{low}}$ 取值为 7.8 kW, $P_{\text{bat}}^{\text{max}}$ 为 20 kW。 $P_{\text{bat}}^{\text{opt}}$ 满足在 Bat/UC 工作模式时系统的效率最优,有

$$\max \eta_{\text{sys}} = \max(\eta_{\text{bat}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{VSC}}^{\text{mode2}}) = \max\{[1 - P_{\text{bat}}^{\text{opt}} R_{\text{bat}} / (V_{\text{bat}} E_{\text{bat}})] \eta_{\text{VSC}}^{\text{mode2}} \eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}}\} \quad (13)$$

式中: η_{sys} 是系统效率; P_{in} 是在 Bat/UC 工作模式时的 DC-DC 输入功率。

$\eta_{\text{VSC}}^{\text{mode2}}$ 仅与输入电压、输出功率相关,在超级电容电压稳定时,式(13)可等效为

$$\max \eta_{\text{sys}} \Leftrightarrow \max\{[1 - P_{\text{bat}}^{\text{opt}} R_{\text{bat}} / (V_{\text{bat}} E_{\text{bat}})] \eta_{\text{DC-DC}}^{\text{mode2}}\} \quad (14)$$

$P_{\text{bat}}^{\text{opt}}$ 根据电池当前电压和内阻自适应辨识:式(14)对应的 $P_{\text{bat}}^{\text{opt}}$ 优化问题可通过函数求导和求极大值 η_{sys} 得出。结合式(14)和式(12),实现了多模式复合电源的自适应工作模式寻优和效率优化。

复合电源系统设计还需考虑系统的安全,存在安全隐患时不再进行效率优化,而是根据超级电容电压和电池 SOC 限制能量源的功率输出。为保证系统电压安全,当超级电容电压高于上限值 $V_{\text{UC}}^{\text{up}}$ 时,强制采用超级电容单独输出模式,有

$$P_{\text{dem}} = P_{\text{UC}} \quad (15)$$

当电池 $S_{\text{bat}} < 0.1$ 时,电池电量不足,为保证电池安全,强制采用 UC/Bat 工作模式,超级电容降压提供恒定功率,电池提供或吸收其余功率

$$P_{\text{UC}} = 0.5 P_{\text{bat}}^{\text{max}} \quad (16)$$

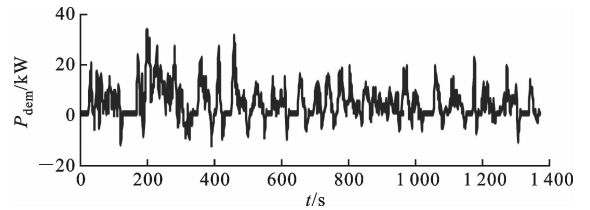
制动时,优先采用超级电容单独回收模式,仅在制动功率大且超级电容电压大于上限值时执行共同回收模式。制动时采用滞环控制策略^[7],超级电容电压滞环区间为 $[0.9, 0.95]$ 。

3 仿真和实验

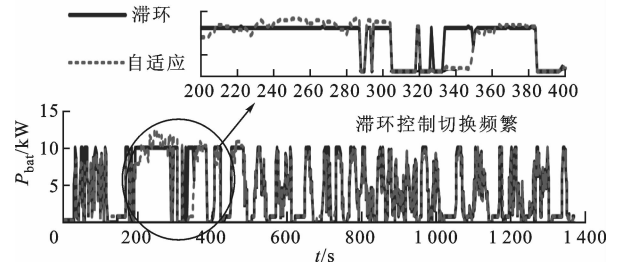
在 Matlab/Simulink/advisor 中搭建电动汽车及多模式复合电源模型进行仿真测试。主要参数如下:汽车质量为 1 350 kg;PMSM 电机功率为 20 kW;电池组为 288 V 80 A·h 的标准模块,单体内阻约为 0.05 mΩ;超级电容为 400 V/16 F。选择 UDDS 路况和 NEDC 路况进行仿真,分别模拟电动汽车低速和高速运行时的多模式复合电源的性能。

为分析能量管理自适应优化方法的有效性,将其与滞环控制^[4,7]进行对比研究,超级电容电压滞环区间为 $[0.9, 0.95]$,在超级电容电压低于 50% 时进行补偿。两种控制策略在制动时的控制方法相同。

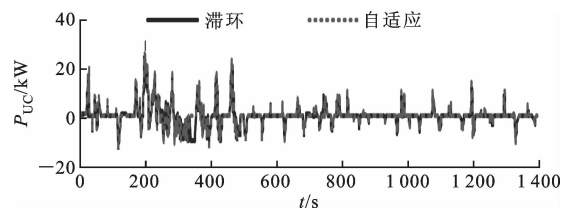
在 UDDS 路况的结果对比如图 5b~图 5e 所示。两种控制策略的超级电容均优先回收制动能



(a) UDDS 路况需求功率



(b) UDDS 路况电池输出功率



(c) UDDS 路况超级电容输出功率

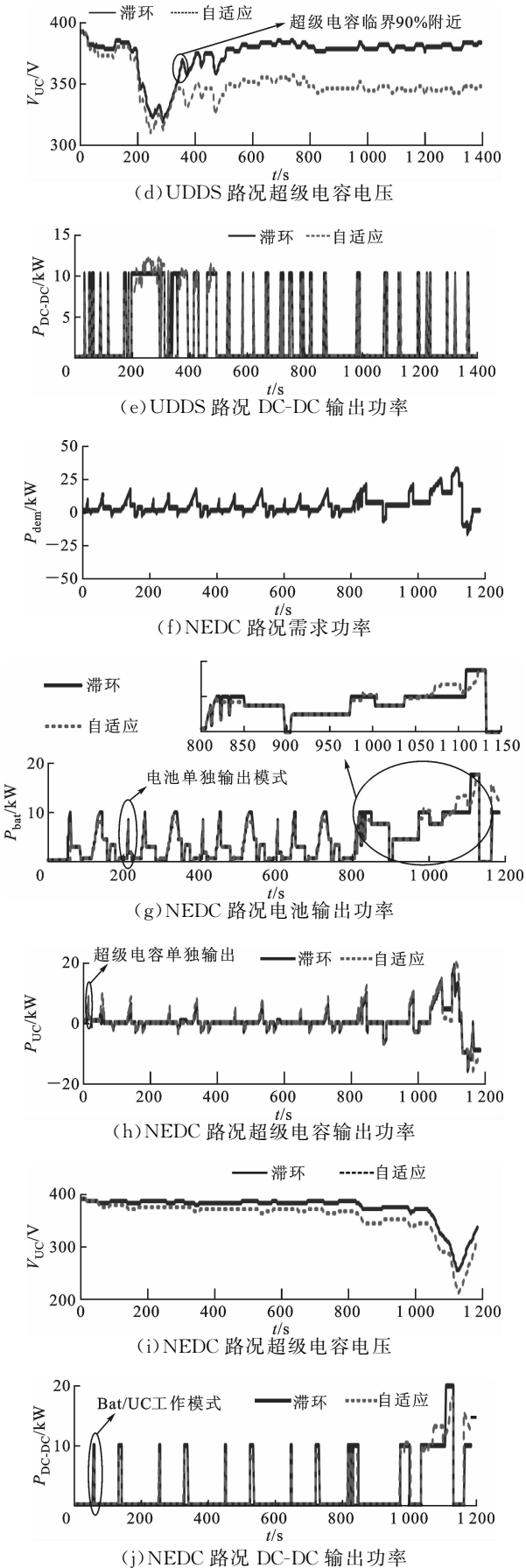


图 5 UDDS 和 NEDC 路况的综合仿真结果比较

量,保证了电池安全。在 200~400 s 输出时,多模式复合电源采用滞环控制使电池组长时间恒功率输出,超级电容电压下降后被快速补偿至 380 V,对应滞环区间的上限值为 0.95。DC-DC 输出功率为 10 kW,接近最优效率。然而,DC-DC 效率最优并不代表系统效率最优,且在系统 200 s 后大功率输出时,电池组没有进行输出功率补偿,在超级电容电压为最高电压的 90%(360 V)附近,电池输出波动很大,因为 90%是滞环区间的下限值,在该值附近工作模式会频繁切换,因此采用滞环控制具有一定的缺陷。

采用能量管理自适应优化方法,通过工作模式寻优和系统效率优化,使 DC-DC 输出接近最优效率,系统效率达到了最优。尤其是在 200~400 s 输出时,电池组输出功率自适应增加进行功率补偿,使功率分配更加合理。同时,采用目标函数进行工作模式自适应寻优,避免了电池输出在滞环区间的下限值附近频繁波动。最后,超级电压稳定在参考电压 350 V 附近。该参考电压随需求功率变化而自适应变化,因此超级电容电压控制更加灵活。如果接下来电动汽车长时间制动,与滞环控制的 380 V 相比,显然超级电容在 350 V 时能回收更多的能量。

为进行量化对比,按式(17)计算两种控制策略的系统效率。在 UDDS 路况下,与滞环控制比较,采用能量管理自适应优化的系统效率提高 1.13%。

$$\eta_{\text{sys}} = \left[\int_0^t (P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{UC}}(t)) dt \right] / \left[\int_0^t P_{\text{dem}}(t) dt \right] \tag{17}$$

在 NEDC 路况下的结果对比如图 5g~图 5j 所示。初期超级电容电压大于最高电压的 95%,两种控制策略均采用超级电容单独输出模式。在 NEDC 路况下,由于需求功率变化不是很频繁,因此两种控制策略的工作模式选择相同,但是两种控制策略功率分配、DC-DC 输出功率不相同。尤其是在 1 100 s 左右大功率输出时,滞环控制的电池组输出功率突然增大、峰值功率输出时间长。采用能量管理自适应优化方法提前进行电池组输出功率补偿,避免了电池输出功率突然增大,同时缩短了峰值功率工作时间,有效保证了电池安全,两种策略的超级电容电压最终接近。在超级电容消耗电量不变的条件下,采用能量管理自适应优化方法的功率分配方式更加合理。在 NEDC 路况下,与滞环控制比较,采用能量管理自适应优化的系统效率提高 1.02%。

为进一步验证多模式复合电源的工作模式切换的合理性及自适应功率补偿控制的有效性,搭建了

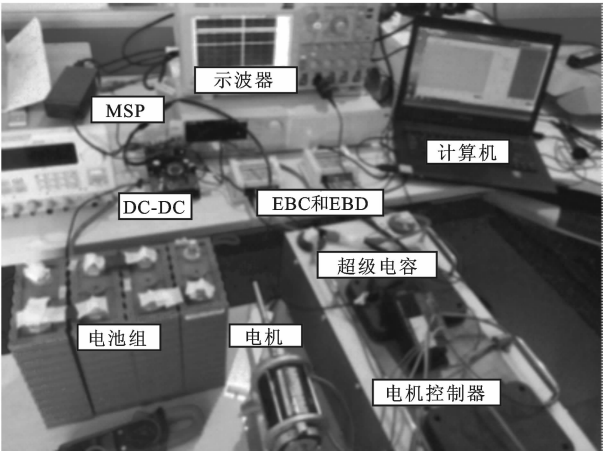


图 6 小功率实验台

图 6 的实验台进行在环测试。实验台功率大小约为仿真条件的 1/200。其中,电池组标准电压为 12.8 V,容量为 80 A·h;超级电容规格为 25 V/94 F;永磁同步电机额定功率为 100 W,峰值为 200 W;DC-DC 最大工作功率为 100 W,额定功率为 50 W,采用 MSP430 控制和 DPO3054 示波器捕获电压。采用 Bat/UC 工作模式时,对应最优效率工作的电池组输出功率接近 50 W。EBC 和 EBD 为充放电测试设备,分别计算电池组和超级电容的输入、输出电流和功率。需求功率分为 5 个峰值功率逐步增加阶段和一个制动阶段。

图 7 为测试结果,在初期超级电容电压高于最高电压的 90%时采用超级电容单独输出模式。在需求功率较小时采用电池单独输出模式;在功率增大时采用 Bat/UC 工作模式。随着超级电容电压持续减小,当低于参考电压时,电池输出功率增加进行自适应补偿,超级电容电压升高。在需求功率进一步增大时,超级电容自适应参考电压变小,超级电容提供峰值功率,电池输出优化功率。最后,再次进行电池输出功率补偿,超级电容电压升高,直到进入制动模式,由超级电容单独回收制动能量。实验结果显示采用能量管理自适应优化方法的多模式复合电源能自适应选择工作模式和补偿电池输出功率;超级电容能及时提供或吸收峰值功率,避免电池组输出功率突然增大,保证了电池安全。

4 结 论

电动汽车多模式复合电源的工作模式繁多,控制策略十分复杂,必须结合汽车运行条件设计合理的能量管理策略才能发挥多模式复合电源的优势。为提高多模式复合电源系统效率,本文提出一种能

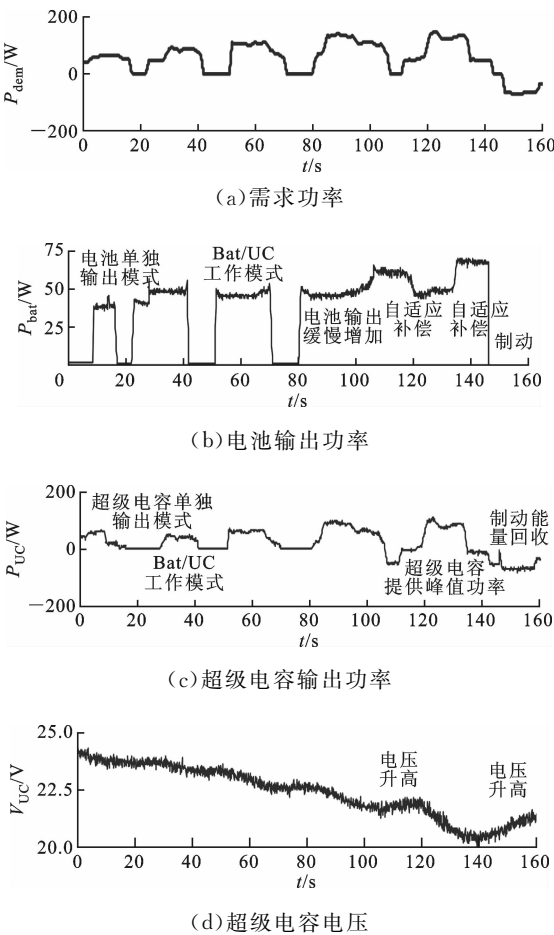


图 7 在环测试时的电池与超级电容输出

量管理自适应优化方法。对多模式复合电源工作模式进行分析,确定超级电容自适应参考电压。建立复合电源系统效率优化目标函数,结合电池 SOC 和超级电容电压设计电池输出功率补偿规则和多模式复合电源能量管理自适应优化方法。仿真和实验结果表明,在 UDDS 和 NEDC 路况下,与滞环控制比较,采用能量管理自适应优化的多模式复合电源系统效率分别提高 1.13% 和 1.02%。多模式复合电源采用能量管理自适应优化方法不仅能自适应选择工作模式和补偿电池输出功率,同时避免了电池组输出功率突然增大,并且保证了电池安全。

参考文献:

[1] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2015, 281: 432-443.

[2] 吴海峰, 鲁军勇, 马伟明, 等. 大功率混合储能装置控制策略研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2): 93-98.

WU Haifeng, LU Junyong, MA Weiming, et al. Con-

- control strategy for high power hybrid energy storage device [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 93-98.
- [3] 曹秉刚, 曹建波, 李军伟, 等. 超级电容在电动车中的应用研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1317-1322.
- CAO Binggang, CAO Jianbo, LI Junwei, et al. Ultracapacitor with applications to electric vehicle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11): 1317-1322.
- [4] CAO Jian, EMADI A. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 122-132.
- [5] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20: 82-102.
- [6] LONG Bo, LIM S T, BAI Zhifeng, et al. Energy management and control of electric vehicles, using hybrid power source in regenerative braking operation [J]. Energies, 2014, 7(7): 4300-4315.
- [7] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang. Design of a novel hybrid power for EV [C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference and Exposition in Transportation Electrification. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [8] XIANG Changle, WANG Yanzi, HU Sideng, et al. A new topology and control strategy for a hybrid battery-ultracapacitor energy storage system [J]. Energies, 2014, 7(5): 2874-2896.
- [9] SONG Ziyu, LI Jianqiu, HAN Xuebing, et al. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles [J]. Applied Energy, 2014, 135: 212-224.
- [10] WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, et al. Compound-type hybrid energy storage system and its mode control strategy for electric vehicles [J]. Journal of Power Electronics, 2015, 15(3): 849-859.
- [11] KUPERMAN A, AHARON I, MALKI S, et al. Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(2): 806-815.
- [12] LI Qi, CHEN Weirong, LI Yankun, et al. Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1): 514-525.
- [13] GARCIA P, TORREGLOSA J P, FERNANDEZ L M, et al. Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(12): 4791-4804.
- [14] SONG Ziyu, HOFMANN H, LI Jianqiu, et al. Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system [J]. Applied Energy, 2014, 134: 321-331.
- [15] WU Lianghong, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang, et al. Multiobjective optimization of HEV fuel economy and emissions using the self-adaptive differential evolution algorithm [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2458-2470.
- [16] WAAG W, SAUER D U. Adaptive estimation of the electromotive force of the lithium-ion battery after current interruption for an accurate state-of-charge and capacity determination [J]. Applied Energy, 2013, 111: 416-427.
- [17] MICHALCZUK M, GRZESIAK L M, UFNALSKI B. A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle [J]. Electrotechnical Review, 2012, 88: 158-162.

[本刊相关文献链接]

- 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 采用模拟退火算法的电动汽车复合电源能量管理系统优化. 2015, 49(8): 90-96. [doi:10.7652/xjtuxb201508015]
- 杨晴霞, 曹秉刚, 徐俊, 等. 一种估计锂电池充电状态的分数阶阻抗模型. 2015, 49(8): 128-132. [doi:10.7652/xjtuxb201508021]
- 高建平, 葛坚, 赵金宝, 等. 复合电源系统功率分配策略研究. 2015, 49(7): 17-24. [doi:10.7652/xjtuxb201507004]
- 袁希文, 文桂林, 周兵. 考虑侧向稳定性的分布式电驱动汽车制动滑移率控制. 2015, 49(5): 43-48. [doi:10.7652/xjtuxb201505007]
- 许建, 张政, 李翔, 等. 独立驱动电动汽车横摆力矩的模糊控制算法. 2014, 48(7): 83-89. [doi:10.7652/xjtuxb201407015]
- 续丹, 王国栋, 曹秉刚, 等. 独立驱动电动汽车的转矩优化分配策略研究. 2012, 46(3): 42-46. [doi:10.7652/xjtuxb201203008]
- 龙波, 曹秉刚, 胡庆滑, 等. 电动汽车用感应电机弱磁区电磁转矩最大化控制. 2009, 43(4): 62-65. [doi:10.7652/xjtuxb200904015]
- 曹秉刚, 曹建波, 李军伟, 等. 超级电容在电动车中的应用研究. 2008, 42(11): 1317-1322. [doi:10.7652/xjtuxb200811001]

(编辑 武红江 苗凌)