

DOI: 10.7652/xjtuxb201508015

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

王斌, 徐俊, 曹秉刚, 续丹, 邹忠月

(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: 针对电动汽车的混合式复合电源工作模式切换复杂、不利于不同工作模式的功率最优分配问题,提出基于模拟退火算法的复合电源能量管理优化方法。对混合式复合电源的工作模式进行分层讨论,建立能量管理系统的各部件损耗模型,基于不同层次设计能量管理策略。在分层能量管理策略的基础上,采用模拟退火算法降低系统的损耗。搭建混合式复合电源仿真模型和实验台进行仿真和实验。仿真和实验结果表明:在 NYCC 和 EUDC 路况下,混合式复合电源能量管理系统采用模拟退火算法优化比滞环逻辑控制的总损耗降低 0.8% 和 1.1%。混合式复合电源能量管理系统采用模拟退火算法不仅能有效降低系统损耗,实现功率最优分配,而且能及时跟随功率需求,由超级电容提供或吸收峰值功率,保证电池安全。

关键词: 电动汽车;复合电源;模拟退火算法;能量管理系统

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)08-0090-07

Optimization of Energy Management System with Simulated Annealing Approach for Hybrid Power Source in Electric Vehicles

WANG Bin, XU Jun, CAO Binggang, XU Dan, ZOU Zhongyue

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An optimization method based on simulated annealing (SA) approach for the energy management of the compound-type hybrid power source (CHPS) is proposed to focus on the operating modes of CHPS and the optimization of power distributions in different operating modes. The operating modes of the CHPS are divided into different layers, and loss models of different components are established for the energy management system. Energy management strategies are designed for different layers. The SA approach is used to reduce the system loss on the basis of the energy management strategies in different layers. A simulation model and an experimental platform of the CHPS are constructed. Experimental results and comparisons with the hysteresis-logic threshold control strategy show that the total system loss of the CHPS using the proposed method reduces 0.8% and 1.1%, respectively, in the NYCC and EUDC drive cycles. It can be concluded that the proposed energy management system of the CHPS reduces the system loss and realizes the optimization of power distributions. Moreover, the CHPS can respond to the power demands, provide or absorb peak powers by ultracapacitor (UC), and ensures the safety of batteries.

收稿日期: 2015-03-24。 作者简介: 王斌(1987—),男,博士生;曹秉刚(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405374)。

网络出版时间: 2015-07-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150717.1718.004.html>

Keywords: electric vehicle; hybrid power source; simulated annealing approach; energy management system

近年来电动汽车在国内外飞速发展,特别是特斯拉风行全球以来,许多汽车公司都在加紧研发高性能的电动汽车,然而,电池技术依旧是高性能电动汽车发展的瓶颈^[1]。传统的电池比能量高,但功率密度不能完全满足电动汽车的功率需求。尽管高功率密度电池,例如三元锂电池,能满足电动汽车的峰值功率需求,但该类电池均衡、安全问题尚未解决^[1-2]。大功率充放电还会减少电池的循环充放电次数,降低其使用寿命^[3-4]。超级电容比功率高,可多次循环充电^[5]。超级电容与锂电池组成复合电源能有效发挥各自的优点,复合电源既能显著提高电动汽车制动能量回收率,也能保证电池能量管理系统的稳定性和可靠性^[6]。

复合电源有电池/超级电容器(Battery/UC)结构、UC/Battery结构和混合式结构等^[7-8]。混合式结构能在 Battery/UC 和 UC/Battery 结构间切换工作,控制更加灵活,但是增加了复合电源能量管理的难度^[9-10]。目前,基于规则的控制^[10]、模糊控制^[11]、神经网络控制^[12]、粒子群算法^[13]、模型预测控制算法^[14]等被广泛应用于复合电源能量管理系统的控制与优化。基于规则的控制策略相对简单,但是系统优化有待提升。模糊控制策略不完全适合控制参数随工作模式大幅度跳变的混合式复合电源。神经网络控制通过训练在理论上可达到最优,但是硬件实现困难。粒子群算法可能陷入局部最优。模型预测控制对模型精确度依赖高,且需要预知路况信息。

模拟退火算法是一种迭代求解的随机寻优算法,能以一定概率跳出局部最优解并寻找全局最优解^[15]。模拟退火算法简单易编程实现,已被成功应用于复合电源的功率跟随控制,并有效延长电池使用寿命^[16]。混合式复合电源能量管理系统优化涉及工作模式切换、功率最优分配两部分。因此,本文首先对混合式复合电源工作模式分层讨论并设计控制策略,然后以复合电源能量管理系统的最小损耗为性能指标建立模拟退火目标函数,将工作模式跳变与模拟退火方式结合,实现基于模拟退火算法的能量管理系统优化。

1 混合式复合电源工作模式分层

混合式复合电源能量管理系统如图 1 所示,该

系统的超级电容电压通常高于电池组电压。开关 S1 控制超级电容输出,选择 Battery/UC 或 UC/Battery 结构的工作模式。开关 S2 控制电池组输出,避免电池组过放电。直流-直流变换器(DC-DC)为 buck-boost 结构,对电池组升压、对超级电容降压。功率二极管使超级电容优先回收制动能量。

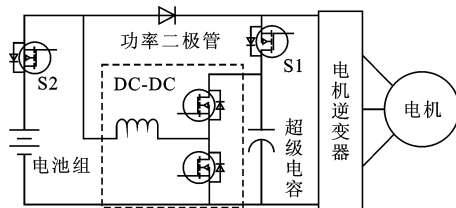
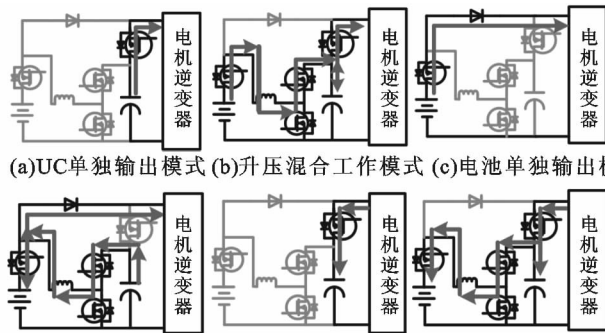


图 1 混合式复合电源能量管理系统

本文的混合式复合电源设计有 4 种能量输出工作模式和 2 种制动能量回收模式,如图 2 所示,包括 UC 单独输出模式、升压混合工作模式、电池单独输出模式、降压混合工作模式、UC 单独回收模式和共同回收模式。为使系统尽可能多地回收制动能量,在输出时,如果超级电容电压高于上限值,采用 UC 单独输出模式;在制动时,如果超级电容电压低于上限值,优先采用 UC 单独回收模式。这 2 种模式仅与超级电容电压相关,且必须强制执行,定义为顶层强制模式。



(a)UC 单独输出模式 (b)升压混合工作模式 (c)电池单独输出模式

(d)降压混合工作模式 (e)UC 单独回收模式 (f)共同回收模式

图 2 混合式复合电源的工作模式

为避免电池组过放电,当电池荷电状态(State of charge, SOC)低于下限值时,采用 UC/Battery 结构降压混合工作模式,超级电容向电池组充电或向逆变器提供能量。制动时,共同回收模式仅在超级电容电压高于上限值时使用。为简化控制,该层对 DC-DC 恒功率降压控制。为延长电池使用寿命,应尽可能避免使用这 2 种工作模式,该层被定义为

底层特殊模式。

剩余的2种工作模式分别为电池单独输出模式、Battery/UC升压混合工作模式,需要择优选择损耗最小的工作模式。该层采用模拟退火算法搜索寻优实现系统的最小损耗,同时完成超级电容荷电状态SOC补偿和系统功率最优分配,因此,该层被定义为目标层寻优模式。混合式复合电源工作模式分层如图3所示。

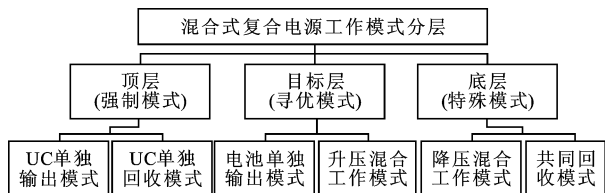


图3 混合式复合电源工作模式分层

2 能量管理策略及优化

2.1 损耗模型

混合式复合电源能量管理系统的损耗包括电池损耗、超级电容损耗、二极管损耗、DC-DC损耗、逆变器及电机损耗。S1、S2开关损耗可忽略。

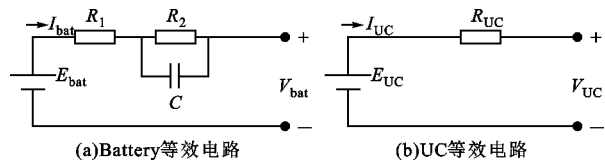


图4 等效电路模型

电池等效电路和功率损耗 P_{bat}^l 为

$$\dot{V}_C = I_{bat}/C - V_C/R_2C \quad (1)$$

$$V_{bat} = E_{bat} - I_{bat}R_1 - V_C \quad (2)$$

$$P_{bat}^l = I_{bat}^2(R_1 + R_2) \quad (3)$$

超级电容的等效电路和功率损耗 P_{UC}^l 为

$$V_{UC} = E_{UC} - I_{UC}R_{UC} \quad (4)$$

$$P_{UC}^l = I_{UC}^2R_{UC} \quad (5)$$

二极管、DC-DC的损耗 P_{dio}^l 、 P_{dc}^l 分别为

$$P_{dio}^l = I_{dio}V_{dio} + I_{dio}^2R_{dio} \quad (6)$$

$$P_{dc}^l = P_{in}(1 - \eta_{dc}) \quad (7)$$

逆变器损耗 P_{inv}^l 近似为定子电流 i_s 的函数^[18],

电机损耗 P_m^l 包括铜损、铁损、机械损耗及杂散损耗^[17-18]

$$P_{inv}^l = (K_1 i_s^2 + K_2 i_s) \quad (8)$$

$$P_m^l = (P_{cu}^l + P_{fe}^l + P_{ms}^l) \quad (9)$$

$$P_{cu}^l = R_{cu}(i_d^2 + i_q^2) \quad (10)$$

$$P_{fe}^l = R_{fe}(i_{fe,d}^2 + i_{fe,q}^2) \quad (11)$$

式中: P_{cu}^l 为铜损; P_{fe}^l 为铁损; P_{ms}^l 为机械损耗与杂散

损耗之和; R_{cu} 、 R_{fe} 为铜损内阻和铁损内阻; i_d 、 i_q 分别为 d 轴和 q 轴电流; $i_{fe,d}$ 、 $i_{fe,q}$ 为 d 轴和 q 轴上的铁损电流。

2.2 能量管理及优化算法实现

顶层采用逻辑门限控制方法。定义超级电容电压的90%为上限值,当满足顶层条件时,有

$$P_{UC} - P_{UC}^l = P_{dem} \quad (12)$$

式中: P_{UC} 为超级电容输出功率; P_{dem} 为需求功率。

顶层采用超级电容单独提供或吸收功率,通过超级电容主动放电向目标层转换进行寻优。

电池和超级电容的SOC计算公式为

$$S_{bat} = S_{bat}^0 - [\eta \int_0^t I_{bat}(t) dt] / C_t \quad (13)$$

$$S_{UC} = 2E_{cap} / C_{UC} V_{UCmax}^2 \quad (14)$$

式中: S_{bat} 是电池SOC; S_{bat}^0 是电池初始SOC; S_{UC} 是超级电容SOC; C_{UC} 、 E_{cap} 分别是超级电容容量和实际储存能量, $E_{cap} = C_{UC} V_{UC}^2 / 2$ 。

目标层的能量管理策略既要完成工作模式的选择和切换,又要实现系统的最小损耗。目标层的电池单独输出模式和升压混合工作模式满足

$$P_{bat} - P_{bat}^l - P_{dio}^l = P_{dem} \quad (15)$$

$$(P_{bat} + P_{UC}) - (P_{bat}^l + P_{dc}^l + P_{UC}^l) = P_{dem} \quad (16)$$

式中: P_{bat} 是电池输出功率。

由式(15)、(16)可知,电池单独输出模式对应的功率只有一个解,而升压混合工作模式对应多组解,需要进行比较寻优。电池和超级电容输出功率不同则对应的损耗也不同。为使模拟退火算法同时实现模式选择和寻优功能,模拟退火函数的初值被设计为电池单独输出模式对应的解,如果后面搜索值对应的损耗小于初值对应的损耗,则选择升压混合工作模式,并不断更新初值,否则不更新,选择电池单独输出模式。

模拟退火函数为

$$f = \min(P_{bat}^l + P_{UC}^l + P_{dio}^l + P_{dc}^l + P_{inv}^l + P_m^l) \quad (17)$$

服从限制条件:①当 $V_{UC}^{target} < V_{UC} < 0.9$, $S_{bat} > 0.1$, 不补偿超级电容电量。定义电池和超级电容最大功率为 P_{bat}^{max} 、 P_{UC}^{max}

初值 $P_{dc}^l + P_{UC}^l = 0, P_{UC} = 0$
更新值 $P_{dio}^l = 0, 0 < P_{bat} < P_{bat}^{max}, P_{UC} < P_{UC}^{max}$ } (18)

②当 $V_{bat} \leq V_{UC} \leq V_{UC}^{target}$, $S_{bat} > 0.1$, 补偿超级电容电量。定义DC-DC最高效率输出为 P_{dc}^{eff}

初值

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{dio}}^l = 0; P_{\text{bat}} &= \frac{S_{\text{UC}}^{\text{tar}} - S_{\text{UC}}^{\text{max}}}{S_{\text{UC}}^{\text{tar}} - S_{\text{UC}}^{\text{min}}} (P_{\text{bat}}^{\text{max}} - P_{\text{dc}}^{\text{eff}}) + P_{\text{dc}}^{\text{eff}} \\ \text{更新值} \\ (P_{\text{dc}}^{\text{eff}} + P_{\text{bat}}^l + P_{\text{dc}}^l) &< P_{\text{bat}} < P_{\text{bat}}^{\text{max}}; P_{\text{UC}} < P_{\text{UC}}^{\text{max}} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

为保证超级电容有足够电量和系统损耗最小,在额定或峰值功率需求条件下,采用升压混合工作模式的损耗小于或等于电池单独输出的损耗。 $V_{\text{UC}}^{\text{tar}}$ 满足

$$(P_{\text{sum1}}^l) V_{\text{UC}}^{\text{tar}} \leq (P_{\text{sum2}}^l) V_{\text{bat}} \quad (20)$$

式中: $(P_{\text{sum1}}^l) V_{\text{UC}}^{\text{tar}} = (P_{\text{bat}}^l + P_{\text{dio}}^l + P_{\text{inv}}^l + P_{\text{m}}^l) V_{\text{bat}}$ 是逆变器电压为 V_{bat} 时的损耗; $P_{\text{sum2}}^l = (P_{\text{bat}}^l + P_{\text{UC}}^l + P_{\text{dc}}^l + P_{\text{inv}}^l + P_{\text{m}}^l) V_{\text{UC}}^{\text{tar}}$ 是逆变器电压为 $V_{\text{UC}}^{\text{tar}}$ 时的损耗; $V_{\text{UC}}^{\text{tar}}$ 对应升压混合工作模式; V_{bat} 对应电池单独输出模式。

退火方式基于工作模式跳变和 DC-DC 高效工作区域设计,初值对应电池单独输出模式,其余值对应升压混合工作模式,并以 DC-DC 最高效率点为中心展开随机搜索。因此,高效工作区的退火方式为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{bat}}[k+1] &= \alpha P_{\text{bat}}[k], (k = 2 : 5\,000) \\ P_{\text{bat}}[2] - (P_{\text{bat}}^{\text{loss}}[2] + P_{\text{dc}}^{\text{loss}}[2]) &= P_{\text{dc}}^{\text{eff}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: α 为模拟退火随机搜索算子,当 $k = 2, \alpha = 1$ 时,对应 DC-DC 最高效率工作点, k 为每一步搜索次数。非高效工作区结合式(19)进行超级电容电量补偿。

DC-DC 高效工作区间的上限值和下限值相差约为 4.5 kW, k 取值为 5 000,搜索值平均间距低于 1 W。对搜索结果进行比较,如果损耗小于之前的值,则 $P_{\text{bat}}[k+1]$ 更新为当前最优值,否则 $P_{\text{bat}}[k+1]$ 不更新。搜索终止条件为:①如果 $P_{\text{bat}}[k+1]$ 连续 500 次不更新,搜索强制终止;② $P_{\text{bat}}[k+1]$ 不断更新,搜索次数等于 5 000。因此,通过不大于 5 000 次的搜索值对比和不断更新的最优值,能实现系统损耗最小和功率最优分配。

底层工作的混合式复合电源在 $S_{\text{bat}} < 0.1$ 输出时,系统应提示电量不足;制动时,超级电容电压高于 90% 时采用共同回收模式,使工作模式向目标层转换进行寻优。为提高系统效率,底层采用恒功率控制,恒定功率等于 DC-DC 最高效率工作的功率

$$P_{\text{UC}} - P_{\text{UC}}^l = P_{\text{dc}}^{\text{eff}} < P_{\text{bat}}^{\text{max}} \quad (22)$$

全局的分层能量管理及优化如图 5 所示。当位于顶层或底层时,能量管理策略通过对超级电容主动充放电或对电池 SOC 补偿,使工作模式向目标层



图 5 全局能量管理及优化

靠拢和转换,进而采用模拟退火算法寻优实现系统最小损耗。能量管理及优化算法的输出形式是电池和超级电容的输出功率,在顶层和底层时采用逻辑门限控制超级电容吸收或输出功率;在目标层采用模拟退火算法优化电池组输出功率,超级电容提供其余功率来实现功率最优分配。

3 仿真和实验

对 3.2 V80 Ah 的锂电池进行直流内阻测试,多组电流放电测试的直流电阻接近平均内阻,单体内阻为 0.05 mΩ。对 75 V、96 F 的超级电容进行测试,模块内阻低于 0.82 mΩ。电机额定功率为 20 kW,峰值功率为 40 kW,逆变器相关参数为 $K_1 = 0.325$, $K_2 = 1.05$, $R_{\text{cu}} = 0.049$, $R_{\text{fe}} = 670$ 。

DC-DC 的效率和高效工作区如图 6 所示。相应的搜索算子 α 的区间为 $[0.78, 1.23]$ 。根据式(18)~(21),当 $V_{\text{UC}}^{\text{tar}} < V_{\text{UC}} < 0.9$, DC-DC 在高效工作区寻优,当 $V_{\text{bat}} \leq V_{\text{UC}} \leq V_{\text{UC}}^{\text{tar}}$, DC-DC 在超级电容电量补偿区间寻优。

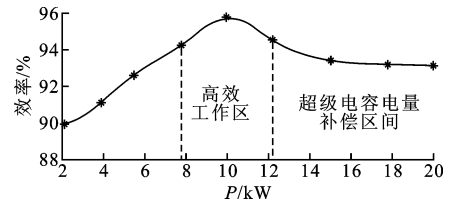


图 6 DC-DC 的效率

为证明上述能量管理策略,搭建复合电源能量管理系统模型和车辆仿真模型在 NYCC 和 EUDC 路况下仿真,电动汽车的整车质量为 1 350 kg。图 7 是 DC-DC 在两种路况下的输出,在 NYCC 路况

下,DC-DC 在最高效率点 10 kW 附近工作。在 EUDC 路况下,在 250 s 至 350 s 时功率需求大,超级电容 SOC 急速下降,此时 DC-DC 工作在超级电容 SOC 补偿区间。仿真结果证明模拟退火算法能有效控制 DC-DC,并通过迭代搜索使 DC-DC 工作在最优状态。图 8 是采用分层模拟退火算法优化和滞环逻辑控制^[7,10]结果的对比。

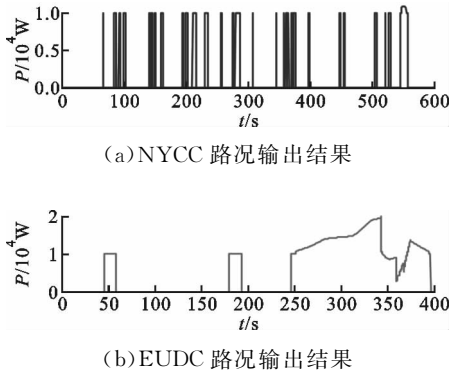


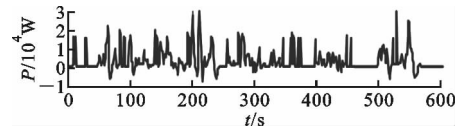
图 7 两种路况的 DC-DC 输出结果

图 8a~图 8d 是在 NYCC 路况的结果对比。两种能量管理策略在超级电容电压高于上限值 90% 时,超级电容均单独输出。与滞环逻辑控制相比,采用分层模拟退火算法优化的电池输出功率仅在末期输出较大,其他条件下略高于或逼近滞环逻辑控制结果,但是超级电容获得了更多的能量。在电池输出能量几乎不增加的条件下采用分层模拟退火算法达到了系统最优,超级电容 SOC 最终稳定在目标值附近。由超级电容 SOC 曲线可看出,超级电容电量消耗降低了 4.2%。

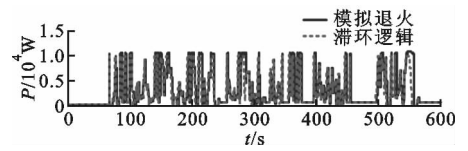
图 8e~图 8h 是 EUDC 路况的结果对比。滞环逻辑控制在超级电容电压低于下限值时才会补偿,因此复合电源采用滞环逻辑控制在 300 s 后才进行超级电容 SOC 补偿,而电池输出功率突然增大会严重缩短电池使用寿命。复合电源采用分层模拟退火算法在 250 s 后就主动进行超级电容 SOC 补偿,使电池输出功率平滑增加,有效地保证了电池安全,同时,超级电容 SOC 维持在 0.5 以上,尽管电池输出能量稍微增加,但是超级电容最终电量消耗降低了 6.4%。

为验证能量管理系统采用模拟退火算法优化能有效降低系统损耗,采用式(23)计算系统的总损耗,并和滞环逻辑控制的结果^[7]进行比较,证明在 NYCC 和 EUDC 路况下的系统总损耗分别降低了 0.8% 和 1.1%。

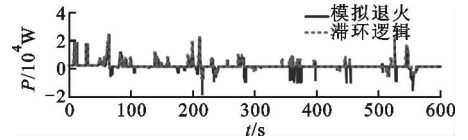
$$Q_{\text{loss}} = \int_0^t [P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{UC}}(t) - P_{\text{dem}}(t)] dt \quad (23)$$



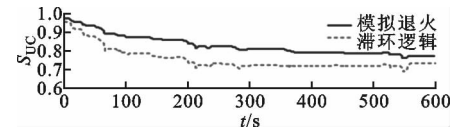
(a) NYCC 路况需求功率



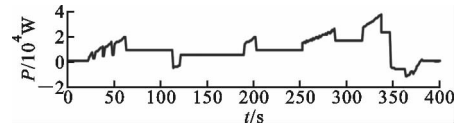
(b) NYCC 路况电池输出功率对比



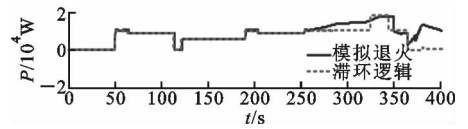
(c) NYCC 路况超级电容输出功率对比



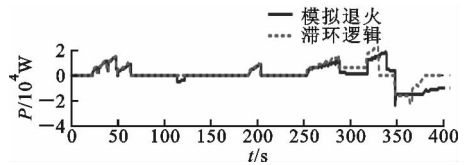
(d) NYCC 路况超级电容 SOC 比较



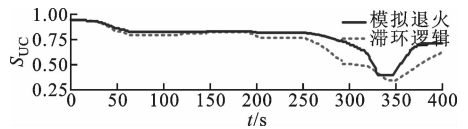
(e) EUDC 路况需求功率



(f) EUDC 路况电池输出功率对比



(g) EUDC 路况超级电容输出功率对比



(h) EUDC 路况超级电容 SOC 比较

图 8 模拟退火算法和滞环逻辑控制的仿真结果对比

为进一步验证混合式复合电源的常用工作模式及能量管理优化,搭建了图 9 所示的小功率在环测试平台进行验证,在环测试的最大需求功率约为仿

真的 1/200。设计 DC-DC 最高效率点约为 50 W,其高效工作区取值在 50 W 附近;电池组标准电压为 13.2 V,最大输出功率限制为 100 W;超级电容最高电压设计为 25 V;永磁同步电机的电压工作区间为 13~30 V,额定功率为 100 W。测试结果如图 10 所示。

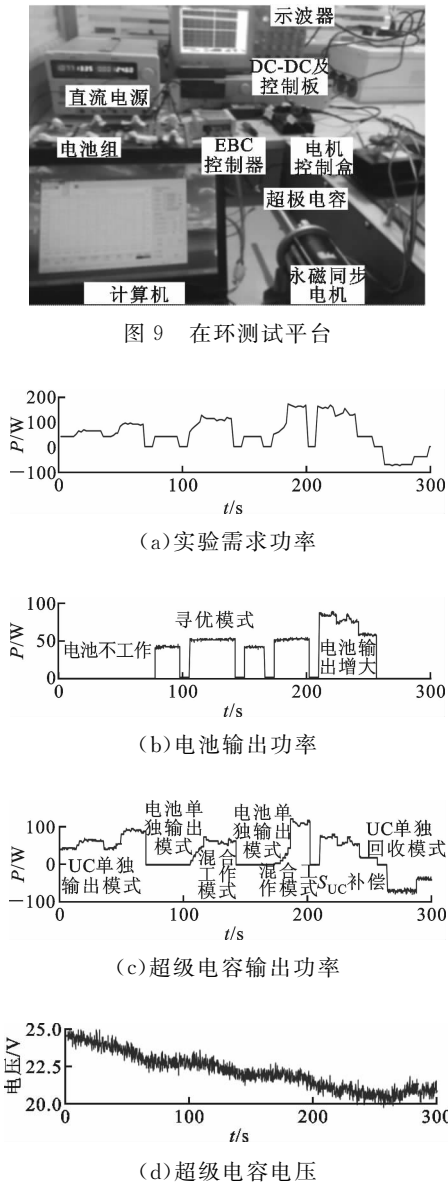


图 10 在环测试结果

图 10 验证了采用分层模拟退火算法优化的混合式复合电源的 UC 单独输出模式、UC 单独回收模式和寻优模式。在 UC 单独输出模式下,对应的 S_{UC} 大于 0.9,在寻优模式下,能自动完成电池单独输出模式、混合工作模式切换,并实现功率最优分配和超级电容 SOC 补偿。由于特殊模式会影响电池使用寿命,实验不使用特殊模式。在环测试结果与仿真结果表明,采用模拟退火算法优化的混合式复合电

源能有效跟随功率需求,超级电容及时提供或吸收峰值功率,实现能量管理优化和保证电池安全。

4 结 论

针对电动汽车的混合式复合电源工作模式切换复杂、不利于不同工作模式的功率最优分配问题,提出基于模拟退火算法的复合电源能量管理优化方法。对混合式复合电源工作模式进行分层讨论,建立能量管理系统各部件损耗模型,以系统最小损耗为性能指标建立模拟退火优化目标函数,以 DC-DC 最高效率点为中心进行寻优和进行超级电容 SOC 补偿,并结合其他层的控制策略,实现能量管理及优化。仿真结果与在环测试结果表明,在 NYCC 和 EUDC 路况下,混合式复合电源能量管理系统采用模拟退火算法优化比传统滞环逻辑控制的总损耗降低 0.8%和 1.1%。混合式复合电源能量管理系统采用模拟退火算法优化能有效降低系统损耗,实现功率最优分配,且能及时跟随功率需求,由超级电容提供或吸收峰值功率,保证电池安全。

参考文献:

[1] LU Languang, HAN Xuebing, LI Jianqiu, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 272-288.

[2] SONG Ziyou, 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.

[3] ONGARO F, SAGGINI S, MATTAVELLI P, et al. Li-ion battery-supercapacitor hybrid storage system for a long lifetime, photovoltaic-based wireless sensor network [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3944-3952.

[4] SONG Ziyou, 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.

[5] 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. Ultra-capacitor with applications to electric vehicle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11): 1317-1322.

[6] 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. Control strategy for high power hybrid energy storage device [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 93-98.
- [7] CAO Jian, EMADI A. 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.
- [8] KHALIGH A, LI Zhihao. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2806-2814.
- [9] 任桂周, 常思勤. 一种基于超级电容器组串并联切换的储能系统 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 187-195.
- REN Guizhou, CHANG Siqin. An energy storage system based on series-parallel switchover of ultra-capacitor banks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 187-195.
- [10] 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.
- [11] 吴志伟, 张建龙, 殷承良. 混合动力汽车用混合能量存储系统的设计 [J]. 汽车工程, 2012, 34(3): 190-196.
- WU Zhiwei, ZHANG Jianlong, YIN Chengliang. The design of hybrid energy storage system for hybrid electric vehicles [J]. Automotive Engineering, 2012, 34(3): 190-196.
- [12] MORENO J, ORTUZAR M E, DIXON J W. Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 614-623.
- [13] SHARAFI M, ELMEKKAWY T Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO: simulation based approach [J]. Renewable Energy, 2014, 68: 67-79.
- [14] HREDZAK B, AGELIDIS V G, JANG M. A model predictive control system for a hybrid battery-ultracapacitor power source [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1469-1479.
- [15] TROVAO J P F, SANTOS V D N, PEREIRINHA P G, et al. A simulated annealing approach for optimal power source management in a small EV [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 867-876.
- [16] TROVAO J P F, PEREIRINHA P G, JORGE H M, et al. A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles: an integrated rule-based meta-heuristic approach [J]. Applied Energy, 2013, 105: 304-318.
- [17] 卢东斌, 欧阳明高, 谷靖, 等. 电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 83-91.
- LU Dongbin, OUYANG Minggao, GU Jing, et al. Optimal regenerative braking control for permanent magnet synchronous motors in electric vehicles [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(3): 83-91.
- [18] 崔纳新. 变频驱动异步电动机最小损耗快速响应控制研究 [D]. 山东: 山东大学控制科学与工程学院, 2005.
- [本刊相关文献链接]**
- 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]
- 杜晓林, 苏涛, 朱文涛, 等. 一种多输入多输出雷达相位编码信号的设计方法. 2014, 48(12): 93-99. [doi:10.7652/xjtuxb201412015]
- 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]
- 黄奎, 莫健华, 余立华, 等. 柔性测量臂运动学建模及参数标定方法. 2010, 44(8): 122-126. [doi:10.7652/xjtuxb201008024]
- 高亮, 孙卫, 朱荣昌. 信息不确定条件下时间序列的关联分析法. 2010, 44(6): 67-71. [doi:10.7652/xjtuxb201006013]
- 魏平, 徐成贤, 段成德. 全局智能优化集成算法研究. 2009, 43(3): 60-64. [doi:10.7652/xjtuxb200912013]
- 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]
- 牛奕龙, 孙进才, 王毅, 等. 三维参数联合估计的免疫记忆量子克隆算法. 2009, 43(4): 75-79. [doi:10.7652/xjtuxb200904018]

(编辑 武红江)