DOI: 10.3901/JME.2019.16.132

基于一种新混合法的车载尾气热电发电 最大功率跟踪研究^{*}

李小龙 谢长君 黄亮 全书海 房伟
(武汉理工大学自动化学院 武汉 430070)

摘要: 为提高车载尾气热电发电 DC/DC 最大功率跟踪算法的动态跟踪速率和稳态精度, 提出一种新型改进电导增量法与自适应变步长 BP 神经网络法相联合的迭代跟踪算法。同时采用带有电压闭环的交错 Buck 变换器, 在建立其小信号模型的基础上, 设计补偿网络保证系统的高效率和稳定性。在两种不同的发动机稳态工况以及动态条件下, 对提出的一种新的混合法和单独的改进电导增量法、单独的 BP 神经网络法, 进行了对比试验。仿真和试验结果证明所提出的算法的可行性和有效性, 相比传统的改进电导增量法、BP 神经网络法, 稳态时混合法跟踪功率最接近实际值, 功率损耗最小, 适于车载尾气热电发电场合。所研究的基于一种新混合法的最大功率跟踪技术, 对设计稳定、高效的车载尾气热电发电系统具有极高的参考价值。

关键词: 车载尾气热电发电; 最大功率跟踪; 电压闭环; 交错 Buck 变换器; 混合法; 功率损耗

中图分类号: TM913

Maximum Power Point Tracking Based on a New Hybrid Method for Automobile Exhaust Thermoelectric Generators

LI Xiaolong XIE Changjun HUANG Liang QUAN Shuhai FANG Wei
(Automation of School, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: To improve the dynamic tracking speed and steady accuracy of the automotive exhaust thermoelectric generator DC/DC maximum power algorithm, a novel iterative tracking algorithm is proposed based on the combination of the improved incremental conductance method and adaptive variable step size BP artificial neural network. Besides, an interleaved buck converter with voltage closed loop is used, then based on building its small signal model compensation design is given to ensure high efficiency and system stability. Comparative experiments under two different engine steady and the dynamic conditions are carried out with a new hybrid method (HM) proposed and the single improved incremental conductance (SIINC) method, single BP artificial neural network (SBP-ANN) algorithm. Simulation and experimental results verify the feasibility and availability of the proposed algorithm, comparing with the SIINC method and SBP-ANN algorithm respectively, and in the steady state, the HM is approximately equal to the actual value and the power losses are the least, thus it is suitable for automotive exhaust thermoelectric generator scenarios. The maximum power tracking technology based on a new hybrid method proposed has a strong reference value for designing the stable and efficient automotive exhaust thermoelectric generation system.

Key words: automotive exhaust thermoelectric generator; maximum power tracking; voltage closed loop; interleaved Buck converter; hybrid method; power losses

0 前言

发动机是传统燃油汽车及油电混合动力汽车的

核心部件, 而常用汽油发动机在做功过程中仅有约 30% 的能量用于驱动车辆行驶和供车载电器使用, 约 40% 的能量以废热形式由尾气散出, 排气管的平均温度超过 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1-2]。提高传统燃油汽车和混合动力汽车的燃油效率以及减少有害气体排放显得尤为重要, 因此车载尾气热电发电系统研究意义重大, 它是在汽车排气管表面安装热电发电模块将废热能

^{*} 国家自然科学基金(51477125)、湖北省自然科学基金杰青(2017CFA049)、湖北省技术创新重大(2018AAA059)资助项目。20181006 收到初稿, 20190525 收到修改稿

转变成电能, 由 DC/DC 变换器把电能存储到电池中^[3]。目前, 关于车载尾气热电发电的研究主要集中在热电模块的建模^[4], 设计和提高热能气箱的传热性能^[5-6], 改善热电模块的拓扑连接^[7]。

汽车尾气热电发电机 (Automotive exhaust thermoelectric generator, AETEG) 的输出功率主要受发动机工况和外部负载的影响, 当发动机工作在稳定的转速时, 热电发电机功率值随着电压的增长先增长再减少, 因而存有一个最大功率点^[8]。最大功率跟踪 (Maximum power point tracking, MPPT) 的研究集中于光伏发电系统中, 有基于扰动的自寻优算法、智能处理方法和多种方法的结合等^[9]。周大宝等^[10]提出了改进型变步长电导增量法的策略, 用步长调整系数 $S=|dP/dV|/I$ 的值来动态调整步长变化量 ΔU_{ref} , 同时为了保证算法的收敛, 规定 $S<1$, 但是常数 ΔU_{ref} 一经选取就无法改变, 其只适用于特定的外界条件。董密等^[11]提出了零均值电导增量法, 是在一个开关周期内保证 $dP_{PV}/dV_{PV}=0$, 来减少振荡, 但是边界误差 e 的选取是个难题, e 过大, 无法减小振荡; e 过小, 与传统的电导增量法无异。KHALDI 等^[12]提出了一种新型的 BP 神经网络 MPPT 算法, 仿真结果表明相比于传统的电导增量法、干扰观测法, 所提的算法的效率更高以及稳态时振荡更小, 但所需输入量(光照强度、温度)的数量很大。DOUNIS 等^[13]提出一种新型的直接自适应神经网络 MPPT 法, 其在线过程是基于 σ 规则的学习算法, 相比于传统的干扰观测法, 其动态性能大大提高和稳态时波动大大减少。另外, 一些学者设计简便的 MPPT 硬件电路, 达到减少变换器损耗, 提高系统输出功率的目的^[14-15]。

文献[9-13]主要研究的是光伏系统的 MPPT 策略, 但是 AETEG 的功率-电压输出特征与光伏电池有较大区别(其温度变化较慢), 本文在上述方法的前提下, 提出一种新混合合法, 即改进电导增量法和自适应变步长 BP 神经网络法的联合。第一阶段改进电导增量法可以快速运行于临近最大功率点的参考点, 第二阶段自适应变步长的 BP 神经网络法的 MPPT 控制器消除了稳态时最大功率点附近的振动, 另外为了适于 AETEG 系统, 还设计了带串联滞后环节的 MPPT 两相交错 Buck 变换器, 伯德图和根轨迹图均表明有电压闭环的 MPPT 控制器的稳、动态性能优于之前, 仿真和试验结果证明新的混合合法具有快速的跟踪速度, 无需额外的电路并不产生额外的功率损耗。

1 AETEG 系统及建模

1.1 AETEG 新型电源的总体结构

AETEG 系统结构图如图 1 所示, 包含一个热能气箱、两个热电转换模组和一套独立的制冷系统。其中, 热电模块 (Thermoelectric module, TEM) 的温度高的一侧与热能气箱接触, 而温度低的一侧与冷却水箱相连。发动机的尾气出口和热能气箱的入口相连进行热传输, 尾气经过热能气箱、排气管后通入大气。同时, 冷却系统有一个水箱、两个阀门和一个风冷水泵。由于热电器件的输出特性偏软, 随着输出电流的增加, 输出电压急剧下降, 无法匹配负载的供电电压等级, 需要 DC/DC 变换器连接 48V 蓄电池, 给车内电器供电。

图 1 AETEG 系统结构

1.2 TEM 电路特性

图 2 为单个热电发电器件 TEM 的电路模型, 由此可得 TEM 的开路电压和输出功率是负荷和热、冷端温度差的函数^[16], 如下所示

$$U_{OC} = n \cdot \alpha_{PN} \cdot \Delta T = n \cdot \alpha_{PN} \cdot (T_H - T_L) \quad (1)$$

$$P_L = U_L \cdot I_L = \frac{n^2 \cdot \alpha_{PN}^2 \cdot (T_H - T_L)^2}{(R_{in} + R_L)^2} \cdot R_L \quad (2)$$

$$R_{in} = n \cdot \rho \cdot (l_N / A_N + l_P / A_P) \quad (3)$$

式中, α_{PN} 为塞贝克系数, 与温度梯度和安装压力有关, ΔT 为 TEM 的热、冷端的温差, n 为热电偶的个数; 式(3)中, ρ 是电阻率, l_N 、 l_P 分别为 TEM 的 N、P 型电偶臂长度, A_N 、 A_P 分别为 N、P 型电偶臂截面面积。通常, TEM 串联连接成热电发电机(假设 TEM 个数是 M), 其开路电压和内阻分别为^[17]

$$U_{TEG} = \sum_{i=1}^M U_{OC}(i) \quad (4)$$

$$R_{TEG} = \sum_{i=1}^M R_{in}(i) \quad (5)$$

图 2 一个 TEM 等效电路图

依据功率传输定理,当 $R_L = R_{TEG}$ 时,载荷 R_L 得到最大功率,如式(6)所示

$$P_{Lmax} = \frac{U_{TEG}^2}{4R_{TEG}} \quad (6)$$

在 AETEG 试验台架中,当热、冷端温度梯度分别为 170 °C、210 °C、250 °C、270 °C 时热电发电机的 I-U-P 的特征曲线如图 3 所示。当温差稳定时,其输出功率-电流曲线只有一个极值点,即最大功率点。

图 3 冷源温度 60 °C 时不同热源温度的 I-U-P 特征曲线

1.3 交错 Buck 变换器建模

一般,DC/DC 变换器以低压大电流给电池供电。但是,大电流会产生一系列问题(高电流应力、更多的开关管导通损耗),同时,输入、输出侧电流纹波会对热电发电机、电池有不利影响。为了降低输入侧电流纹波,电感宜工作于电流连续模式,但电感值会很大,其重量、体积都会急剧增加,所以采用两相交错 Buck 变换器^[18-20]。图 4 显示了

图 4 交错 Buck 拓扑及 MPPT 控制结构

数字控制 DC/DC 变换器接在 AETEG 和 48 V 的 LiFeO_4 电池之间,并能实现 MPPT 算法。图 5 所示两路开关管 Q1、Q2 的驱动信号,它们在 DSP 芯片 TMS320F28335 中 PWM 模块产生,相错 180°相角,电感电流 I_{L1} 、 I_{L2} 是负荷电流 I_{out} 的一半,其 L_1 、 L_2 电感值变小,总电流纹波小于单相纹波^[18]。

图 5 电感电流连续模式下电路工作波形

DC/DC 变换器系统为非线性时变系统,一般的线性理论不能直接应用,为了进行动态特性分析和相关设计,采用了状态空间平均法^[19]。理想情形下,两相交错 Buck 可视为两单相 Buck 相加。根据单 Buck 电路工作过程,选取状态矢量 $\mathbf{x} = (U_{in} \ I_L \ U_o)^T$,为热电发电机的输出电压、滤波电感电流以及负载侧电压;输入矢量 $\mathbf{u} = (I_{in})$,为热电发电机的输出电流;输出矢量 $\mathbf{y} = (U_{in})$,为热电发电机的输出电压,因此可建立单 Buck 电路的状态空间表达式

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (7)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (8)$$

式中,状态、输入矩阵依次是 $\mathbf{A} = (\mathbf{N} \ \mathbf{P} \ \mathbf{Q})^T$ 、 $\mathbf{B} = (1/C_1 0 0)^T$ 、 $\mathbf{N} = (0 d/L 0)^T$ 、 $\mathbf{P} = (-d/C_1 R(1-2d)/L 1/C_2)$ 、 $\mathbf{Q} = (0(1-2d)/L - 1/(C_2 R 0))$;式(8)中,输出和前馈矩阵依次是 $\mathbf{C} = (100)$ 、 $\mathbf{D} = (0)$ 。依据单相 Buck 模型,两相交错 Buck 电路的状态、输入、输出以及前馈矩阵分别为 $(2\mathbf{N} \ 2\mathbf{P} \ 2\mathbf{Q})^T$ 、 $(1/C_1 0 0)^T$ 、 (100) 、 (0) 。在稳态点加入一个扰动量,此时两相交错 Buck 电路的非线性交流小信号状态方程为

$$\begin{pmatrix} \frac{d\hat{U}_{in}}{dt} \\ \frac{d\hat{I}_L}{dt} \\ \frac{d\hat{U}_o}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{U}_{in} \\ \hat{I}_L \\ \hat{U}_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{1}{C_1} I_{in} +$$

$$\begin{pmatrix} -\frac{\hat{U}_{in}}{C_1} \\ \frac{2(\hat{U}_{in} - 2R\hat{i}_L - 2\hat{U}_o)}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \hat{d} \quad (9)$$

由于滤波电感等效电阻 R 很小,可忽略其影响,故 DC/DC 输入电压对占空比 d 的传递函数为

$$\frac{\hat{U}_{in}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{a_3 s^2 + a_2 s + a_1}{b_3 s^2 + b_2 s + b_1} \quad (10)$$

式中

$$\begin{aligned} a_3 &= I_{in} \cdot C_2 \cdot R_o \cdot L; \\ a_2 &= I_{in} \cdot L; \\ a_1 &= 2R_o \cdot I_{in} \cdot (2d-1); \\ b_3 &= d^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_o; \\ b_2 &= d^2 \cdot (C_1 + 2d \cdot C_2 \cdot R_o); \\ b_1 &= 2d^3. \end{aligned}$$

使用表 1 所示的变换器元件参数和热电发电机在额定功率工作时的电路参数设计 PI 控制器来改善有反馈的 MPPT 控制环的动态稳定性。

表 1 两相交错并联 Buck DC/DC 变换器相应元件参数

参数	数值
额定功率 P/kW	1
输入电压 U_{in}/V	50~350
输出电压 U_{out}/V	45~55
输入侧电容 $C_1/\mu\text{F}$	4 700
输出侧电容 $C_2/\mu\text{F}$	80
输出侧电感 $L/\mu\text{H}$	400

DC/DC 输入电压对占空比 d 的传递函数

$$G_{vd}(s) = \frac{1.344 \times 10^{-6} \times s^2 + 5.6 \times 10^{-4} \times s - 5.04}{2.49 \times 10^{-6} \times s^2 + 1.54 \times 10^{-3} \times s + 0.2}$$

校正前、后的 DC/DC 输入电压对占空比的传递函数如图 6 所示,校正前 $G_{vd}(s)$ 的截止频率为 2.05

图 6 校正前 $G_{vd}(s)$ 、校正后 $Go(s)$ 的波特图

$\times 10^3 \text{ rad/s}$, 相角裕度 $\gamma = -179^\circ$, 幅值裕度 $h = -28 \text{ dB}$, 系统是不稳定的。在 AMTLAB 的 sisotool 中设计一个串联滞后校正环节 $G_c(s) = (-0.25s+1)/s$, 其中 $K_p = -0.25$, $T_i = -0.25$, 校正后开环传递函数 $G_o(s) = G_c(s) \times G_{vd}(s)$, $h = 17.4 \text{ dB}$, $\gamma = 44.1^\circ$, 截止频率 681 rad/s , 系统的稳态性能大大改善。 $G_o(s)$ 的根轨迹图如图 7 所示, 调节时间 $t_s = 4.4/\sigma = 0.76 \text{ s}$, 说明动态性能得到了改善。

图 7 校正后 $Go(s)$ 根轨迹图

2 混合型 MPPT 算法

2.1 改进型电导增量法

通常增量电导法采用定步长策略, 步长变化量 ΔD 的选取具有盲目性。如图 8 所示, 高金辉等^[21]提出 $D(k+1) = D(k) \pm N \cdot |\Delta P / \Delta V|$, 比例因子 N_1 、 N_2 根据曲线 1、2 依次确定, 当采用 N_1 时, 曲线 1 绝大部分时间以定步长 $\Delta D_{\max}$ 运行, 如果热电发电机温度变化, 系统会剧烈震荡, 影响跟踪效率; 当采用 N_2 时, 曲线 1 大部分以变步长 $N \cdot |\Delta P / \Delta V|$ 运行, 响应速度慢, 因此这种方法存在“死区”空间。

图 8 变步长算法示意图

为了解决传统变步长电导增量算法比例系数 N 的问题, 本文在最大功率点跟踪的第一阶段提出了一个新的改进型电导增量法, 如图 9 所示, 曲线 $C_n = P^n \cdot |\Delta P / \Delta V| (n=1, 2, 3, \dots)$ 关于 $P-V$ 曲线 1 的

最大功率点对称,且在最大功率点一侧的变化趋势是先上升后下降,同时,随着 n 的增大, C_n 的极值点就越靠近曲线 1 的最大功率点,但是计算量呈指数级增加,当 $n=3$ 时,该算法跟踪最大功率效果较好,并且要求 DSP 芯片 TMS320F28335 的计算适中。具体流程如下

$$\begin{cases} \frac{dC_3}{dV} > 0 \cap \frac{dP}{dV} > 0 & D(k+1) = D(k) - |\Delta D_{\max}| \\ \frac{dC_3}{dV} \leq 0 \cap \frac{dP}{dV} > 0 & D(k+1) = D(k) - |\Delta D_{\text{ANN}}| \\ \frac{dC_3}{dV} > 0 \cap \frac{dP}{dV} < 0 & D(k+1) = D(k) + |\Delta D_{\text{ANN}}| \\ \frac{dC_3}{dV} \leq 0 \cap \frac{dP}{dV} < 0 & D(k+1) = D(k) + |\Delta D_{\max}| \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\Delta D_{\max}$ 是 MPPT 过程中步长改变量最大值, ΔD_{ANN} 是第二阶段自适应变步长 BP 神经网络法的输出值。

图 9 改进型变步长电导增量法示意图

2.2 自适应变步长 BP 神经网络法

神经网络好处是不需要准确的数学模型,但能建立输入、输出复杂的非线性联系。本文采取的是前馈 BP-ANN 法,共有三层网络,其中隐藏层和输出层的传递函数依次是 tansig、purelin,神经网络通过梯度下降法训练而得,输入层有 2 个神经元,隐藏层有 5 个神经元,输出层仅由 1 个神经元组成。如图 10 所示,其输入量 2 个为热电发电机输出电压的变化量 dV 和输出功率的变化量 dP ,输出量 1 个为标准化的占空比的增加或减少(± 1)。为了调整权值,根据梯度下降法如下式所示

$$\begin{cases} \Delta W_{ji} = \eta \cdot \frac{\partial E}{\partial net_j} \cdot o_i \\ \Delta W_{kj} = \eta \cdot \frac{\partial E}{\partial net_k} \cdot o_k \end{cases} \quad (12)$$

式中, η 是学习率; E 是实际输出与期望输出的误差; net_j 、 net_k 分别是隐藏层、输出层神经元的输入; o_i 、 o_k 分别是输入层、隐藏层神经元的输出。

图 10 提出的 BP 神经网络配置

在 Matlab 中建立神经网络,如图 11 所示,训练迭代 444 次后,方均根误差可以达到 6.86×10^{-3} 。

图 11 误差的训练结果

采用的 BP 神经网络法运行于两种模式:离线模式、在线模式,首先在离线模式下,采集定步长 $\Delta D=0.001$ 的电导增量法在某一个固定外界条件下的 200 组试验数据,使用反向传播算法训练数据,找到合适的神经网络结构。然后,在线模式使用离线 BP 神经网络进行 MPPT。BP 神经网络法的 MPPT 基本原理如下式所示

$$\begin{cases} dP > 0 \cap dV > 0 & Out_{\text{ANN}} = -1 \\ dP > 0 \cap dV < 0 & Out_{\text{ANN}} = +1 \\ dP < 0 \cap dV > 0 & Out_{\text{ANN}} = +1 \\ dP < 0 \cap dV < 0 & Out_{\text{ANN}} = -1 \end{cases} \quad (13)$$

车载热电发电机在稳态运行时,尾气管的温度和热电发电机的输出功率不变或变化缓慢;当发动机的工况发生突变时,尾气的温度和流速会剧烈变化,导致热电发电机输出功率会发生突然变化。如果以传统的定步长 BP 神经网络法寻找新的最大功率点会产生收敛速度慢和稳态下振荡的两难问题。因为若选择较大步长可以保证动态时间缩短但是稳态振荡不可避免;若选择较小步长可以减小稳态振荡但会伴随着动态性能差的问题。为兼顾车载热电发电跟踪速度与稳态精度两方面,本文根据车载热

电发电机功率变化特性, 提出自适应变步长的调整策略, 如下所示

$$D(K) = D(K-1) \pm \left(C + \exp(-|dP|^2) \right) \quad (14)$$

$$\begin{cases} C = C_{\max} \exp(-|dP|^2) \leq \alpha_{\min} \\ C = \frac{(\exp(-|dP|^2) - \alpha_{\min}) \cdot (C_{\max} - C_{\min})}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} + \\ C_{\min} \alpha_{\min} < \exp(-|dP|^2) < \alpha_{\max} \\ C = C_{\min} \exp(-|dP|^2) \geq \alpha_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $D(K)$ 和 $D(K-1)$ 分别是时刻 K , $K-1$ 的开关管占空比; $\exp(-|dP|^2)$ 为步长变化量纲化因子; $\alpha_{\max}$ 和 $\alpha_{\min}$ 分别是设定的量纲化因子的上、下阈值; C 是步长变化调整因子; $C_{\max}$ 和 $C_{\min}$ 分别是调整因子的最大值、最小值。本文提出的自适应变步长调整策略相比于 MESSALTI 等^[22]提出的在线模式变步长法可靠性高。如果车载热电发电最大功率跟踪第二阶段采用在线模式变步长法^[22], 即 $\Delta D = E + M \cdot dP$, E 是固定步长值, M 是比例系数。随着发动机工况的变化, 热电发电机输出功率也随之变化, 导致 M 的选取有盲目性。另外, 本文应用的步长变化量纲化因子 $\exp(-|dP|^2)$ 代替文献[22]的功率变化 dP , 缩小调整因子 C 的取值范围, 可避免 MPPT 控制器发散。

在自适应变步长调整策略中, 采用量纲化因子 $\exp(-|dP|^2)$ 可以实时反映车载热电发电输出功率变化的快慢。当量纲化因子 $\exp(-|dP|^2)$ 处于上限阈值 $\alpha_{\max}$ 和下限阈值 $\alpha_{\min}$ 之间时, 认为热电发电机的状态发生了中度变化, 进而可根据输出功率变化的快慢自适应改变调整因子 C 。

综上所述, 提出一种新的混合 MPPT 算法描述如图 12 所示。

图 12 控制算法流程图

3 仿真与试验分析

3.1 AETEG 系统 Matlab/Simulink 建模

单个热电模块的等效电路模型是一个电压源串联一个电阻, 其输出与热、冷端温度差相关, 如图 13 所示, 热电发电机的 Simulink 模型由 60 个热电模块(Bi_2Te_3)串联组成。

图 13 热电发电机的 Simulink 模型

设定最初热电发电机的温度差 $\Delta T_1 = 198.7^\circ\text{C}$, 在 3 s 时变为 $\Delta T_2 = 94.7^\circ\text{C}$, 再在 6 s 时跃变为 $\Delta T_3 = 198.7^\circ\text{C}$, 最后在 $t = 10$ s 时跃变为 $\Delta T_4 = 57.9^\circ\text{C}$ 。为了更精确地比较各方法的性能, 本文使用 3 个标准: MPPT 跟踪精度、响应时间、超调量。

3.2 仿真结果分析

本文提出的混合法(Hybrid method, HM)、单独的改进型电导增量法(Single improved incremental conductance, SIINC)和单独的 BP 人工神经网络法(Single BP artificial neural network, SBP-ANN)的仿真结果如图 14~16 所示。图 14 是三种 MPPT 算法跟踪精度的仿真波形, 可以看出, 热电发电机温度

图 14 SIINC、SBP-ANN 和 HM 的 MPPT 跟踪精度

差 $\Delta T=198.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, HM、SBP-ANN 和 SIINC 跟踪平均功率依次为 205.3 W、205.2 W、203.6 W; 同时, 热电发电机温差 $\Delta T=94.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, HM、SBP-ANN 和 SIINC 跟踪平均功率值依次为 97.9 W、97.7 W、95.3 W。说明 HM、SBP-ANN 寻找最大功率与理论值非常接近, 稳态精度很高。但是, SIINC 跟踪最大功率时, DC/DC 变换器占空比变动剧烈, 导致功率损失较多, 所以其稳态精度不高。

图 15 SIINC、SBP-ANN 和 HM 的 MPPT 响应时间

图 16 SIINC、SBP-ANN 和 HM 的 MPPT 超调量

如图 15 所示, 当 ΔT 由 0°C 到 198.7°C 时, HM、SIINC 以及 SBP-ANN 跟踪最大功率的响应时间依次为 1.8 s、0.84 s 和 2 s。说明在每个开关周期内, SIINC 采用的步长改变量最大, 故启动时间和响应时间均最短, 而本文提出的 HM, 结合了 SBP-ANN 和 SIINC 的优点, 具有良好的启动速度和响应速度。但是, SBP-ANN 采集定步长 $\Delta D=0.001$ 的电导增量法的试验数据, DC/DC 变换器占空比变化最慢, 故其响应时间最长。

如图 16 所示, 当 ΔT 由 $198.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $57.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, HM 跟踪最大功率的超调量(43.9 W)是 SIINC (21.8 W)的 2.01 倍, 以及是 SBP-ANN (46 W)的 0.95 倍。说明本文提出的 HM 的动态性能优于 SBP-ANN, 但不如 SIINC。对于 SIINC, 当温度突变时, 其步长变化量 ΔD 最小, 所以其超调量最小, 动态性能最好。

3.3 试验结果分析

为验证提出的 HM 的有效性, 建立 AETEG 测试台架, 如图 17 所示, 汽车发动机型号为雪铁龙世

嘉 2.0 PSA RFN 10LH3X, 容量 1 997 mL, 最大功率 108 kW(6 000 r/min), 最大扭矩 200 NM(4 000 r/min); 热能气箱的热传导面积为 $542\text{ mm}\times 280\text{ mm}$, 冷源水箱的冷却面积也为 $542\text{ mm}\times 280\text{ mm}$; 热电模块的材料为 Bi_2Te_3 , 个数为 60 个; DC/DC 变换器额定功率 1 kW, 具体参数如表 1 所示。首先进行稳态跟踪试验, 热电发电机直接与电子负载相连, 通过电流扫描法, 得到热电发电机真实的最大功率, 然后, 热电发电机经嵌入 MPPT 算法的 DC/DC 变换器与 48 V 蓄电池相连。其次进行动态跟踪试验, 1.6 s 时汽车发动机的转速、扭矩由 3 000 r/min@65NM 跃变为 2 600 r/min@58NM, 将本文提出的新的 HM 与传统的 SIINC、SBP-ANN 嵌入到数字控制器 TMS320F28335 中, 其 PWM 模块输出驱动信号给 IGBT 器件实现 MPPT 算法。

图 17 嵌入 MPPT 算法的 AETEG 测试台架

表 2 在 3 000 r/min@65NM 工况下不同的 MPPT 算法结果

因素	实际值	HM	SIINC	SBP-ANN
热端温度 $T_H/^{\circ}\text{C}$	226.9	226.9	226.9	226.9
冷端温度 $T_c/^{\circ}\text{C}$	62.4	62.4	62.4	62.4
电压 U/V	100.4	100.4	100.4	100.4
电流 I/A	1.16	0.94	1.08	1.07
功率 P/W	116.66	114.87	110.49	112.45
偏差率 $e(\%)$	0	1.53	5.28	3.61

表 3 在 2 600 r/min@58NM 工况下不同的 MPPT 算法结果

因素	实际值	HM	SIINC	SBP-ANN
热端温度 $T_H/^{\circ}\text{C}$	105.1	105.1	105.1	105.1
冷端温度 $T_c/^{\circ}\text{C}$	59.5	59.5	59.5	59.5
电压 U/V	50.7	57.2	63.8	82.5
电流 I/A	0.79	0.68	0.56	0.46
功率 P/W	40.1	39.2	35.9	37.9
偏差率 $e(\%)$	0	2.24	10.4	5.50

当汽车发动机运行于两种稳定的工况(3 000 r/min@65NM、2 600 r/min@58NM), 其结果如表 2、3 和图 18、19 所示。如图 18 所示, HM、SIINC 以及 SBP-ANN 跟踪最大功率依次为 114.87 W、110.49

W 和 112.45 W, HM 的偏差率最小(1.53%), 说明 HM 的稳态精度最高与仿真结果一致, 由于实际电路损耗(开关管的开关损耗、导线阻抗损耗)的存在, 其 MPPT 的结果与实际值有一定的误差。如图 19 所示, HM、SIINC 以及 SBP-ANN 寻找到最大功率依次为 39.2 W、35.9 W 和 37.9 W。另外, 当发动机的转速、扭矩由 0 突变到 3 000r/min@65NM 时, HM 的最大功率跟踪启动时间为 2 s, 比 SIINC 多 0.4 s 但是比 SBP-ANN 少 0.8 s, 说明 HM 的启动速度和响应速度介于 SIINC 和 SBP-ANN 之间与仿真结果一致, 由于 HM 的第二阶段采用 BP-ANN, 其步长变化量小于 SIINC 法的 ΔD , 故启动时间不如 SIINC。

图 18 在 3 000 r/min@65NM 工况下 AETEG 实际输出和不同 MPPT 算法的结果

图 19 在 2 600 r/min@58NM 工况下 AETEG 实际输出和不同 MPPT 算法的结果

如图 20 所示为发动机的转速、扭矩由 3 000 r/min@65NM 跃变为 2 600r/min@58NM 的动态过程

图 20 汽车发动机的转速、扭矩由 3 000 r/min@65NM 跃变为 2 600r/min@58NM 下不同 MPPT 算法的结果

中, HM、SIINC 以及 SBP-ANN 的响应时间依次为 2.4 s、2 s 和 3.2 s, 说明 SIINC 的动态响应时间最短, 但是其超调量 5.9W 大于 HM 的 2.1 W、SBP-ANN 的 3.8 W, 对 DC/DC 变换器电路元件损伤较大。试验结果证明本文提出的 HM 在稳、动态的综合表现优于传统的 SIINC 和 SBP-ANN。

4 结论

- (1) 提出基于 48 V 电气架构的 AETEG 系统, 能提高汽车的燃油经济性, 达到节能减排效果。
- (2) 双闭环的交错 Buck 变换器设计实现, 保证 AETEG 系统的高效率和稳定性。
- (3) 基于改进型电导增量法和自适应变步长 BP 神经网络法相结合的最大功率跟踪策略, 在远离最大功率点时采用改进型电导增量法, 能提高系统的动态性能; 在临近最大功率点时采用自适应变步长 BP 神经网络法, 能减小稳态振荡。
- (4) 仿真和试验结果表明, 本文提出的混合法不仅能提高车载热电发电机输出功率, 还减少了系统的响应时间。

参 考 文 献

- [1] CARSTENS J H, GÜ HMANN C. Maximum power point controller for thermoelectric generators to support a vehicle power supply[C]//12th European Conference on Thermoelectrics.Madrid: Materials Today Proceedings, 2014, 790-803.
- [2] KIM S, PARK S, KIM S K, et al. A thermoelectric generator using engine coolant for light-duty internal combustion engine-powered vehicles[J]. Journal of Electronic Materials, 2011, 40(5): 812-816.
- [3] FANG W, QUAN S H, XIE C J, et al. Maximum power point tracking with dichotomy and gradient method for automobile exhaust thermoelectric generators[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(3): 1613-1624.
- [4] ZHANG T. New thinking on modeling of thermoelectric devices[J]. Applied Energy, 2016, 168: 65-74.
- [5] HE W, WANG S X, YANG Y R. Peak power evaluation and optimal dimension design of exhaust heat exchanger for different gas parameters in automobile thermoelectric generator[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 151: 661-669.
- [6] WANG Y P, LI S, XIE X, et al. Performance evaluation of an automotive thermoelectric generator with inserted fins or dimpled-surface hot heat exchanger[J]. Applied Energy, 2018, 218: 391-401.

- [7] COZAR I R, PUJOL T, LEHOCKY M. Numerical analysis of the effects of electrical and thermal configurations of thermoelectric modules in large-scale thermoelectric generators[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 264-280.
- [8] QUAN R, ZHOU W, YANG G, et al. A hybrid maximum power point tracking method for automobile exhaust thermoelectric generator[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, 46(5): 2676-2683.
- [9] JORDEHI A R. Maximum power point tracking in photovoltaic (PV) systems: A review of different approaches[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 1127-1138.
- [10] 周东宝, 陈渊睿. 基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(6): 1491-1498. ZHOU Dongbao, CHEN Yuanrui. Maximum power point tracking strategy based on modified variable step-size incremental conductance algorithm[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(6): 1491-1498.
- [11] 董密, 杨建, 彭可, 等. 光伏系统的零均值电导增量最大功率点跟踪控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(21): 48-53. DONG Mi, YANG Jian, PENG Ke, et al. Zero average incremental conductance maximum power point tracking control for photovoltaic system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(21): 48-53.
- [12] KHALDI N, MAHMOUDI H, ZAZI M, et al. The MPPT control of PV system by using neural networks based on Newton Raphson method[C]//International Renewable and Sustainable Energy Conference. Morocco: IEEE, 2014, 19-24.
- [13] DOUNIS A I, KOFINAS P, PAPADAKIS G, et al. A direct adaptive neural control for maximum power point tracking of photovoltaic system[J]. *Solar Energy*, 2015, 115: 145-165.
- [14] YAMADA H, KIMURA K, HANAMOTO T, et al. A novel MPPT control method of thermoelectric power generation with single sensor[J]. *Applied Sciences*, 2013, 3(2): 545-558.
- [15] DALALA Z, SAADEH O, BDOUR M, et al. A new maximum power point tracking (MPPT) algorithm for thermoelectric generators with reduced voltage sensors count control[J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1826-1841.
- [16] TATARINOV D, KOPPERS M, BASTIAN G, et al. Modeling of a thermoelectric generator for thermal energy regeneration in automobiles[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(7): 2274-2281.
- [17] DENG Y D, ZHENG S J, SU C Q, et al. Effect of thermoelectric modules' topological connection on automotive exhaust heat recovery system[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45(3): 1740-1750.
- [18] GAO J, SUN K, NI L, et al. A thermoelectric generation system and its power electronics stage[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, 41(6): 1043-1050.
- [19] 曾国宏, 王冰清. 基于 Sepic 变换器的组件式 MPPT 技术[J]. *电网技术*, 2014, 38(10): 2784-2788. ZENG Guohong, WANG Bingqing. A Sepic converter based modular maximum power point tracking strategy[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(10): 2784-2788.
- [20] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 等. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(12): 39-46. LU Zhiguo, ZHU Wanping, LIU Jiefeng, et al. A novel interleaved parallel bidirectional DC/DC converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(12): 39-46.
- [21] 高金辉, 唐静. 一种新型光伏系统最大功率跟踪算法的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(23): 21-29. GAO Jinhui, TANG Jing. A novel MPPT method for PV systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(23): 21-29.
- [22] MESSALTI S, HARRAG A, LOUKRIZ A. A new variable step size neural networks MPPT controller: Review, simulation and hardware implementation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 221-233.
-
- 作者简介: 李小龙, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为热电发电技术应用。
E-mail: wyjwyjxl@outlook.com
谢长君(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为新能源电动汽车控制及优化。
E-mail: jackxie@whut.edu.cn
黄亮, 男, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为新能源电力电子。
E-mail: jat_abc@163.com
全书海, 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能控制与信息处理。
E-mail: quanshuh@263.net
房伟, 男, 1978 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为热电发电系统及优化。
E-mail: 37291698@qq.com