

基于高斯混合分布的混合储能电动汽车 DC-DC 变换器的优化设计

黎浩庭, 王学梅

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 结合超级电容与锂电池优势的混合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS)能大幅提高储能系统的各项性能。半主动 HESS 中的 DC-DC 变换器需要工作在剧烈变化的负载功率和输入电压下,以单一工况下性能评价的变换器设计难以找到实际负载条件下的最优方案。基于此,本文提出了基于实际负载分布下功率损耗的变换器参数多目标优化方法。首先,采用二维高斯混合分布模型(2-Dimensional Gaussian Mixture Model, 2D-GMM)拟合出变换器在混合储能系统中工作的负载概率分布。然后,基于损耗模型建立交错并联双向 Buck/Boost 变换器的平均损耗和成本目标函数。最后,通过 NSGA-II 算法搜索帕累托解集,并分析最优解集构成的原因,给出基于平均损耗和成本下的变换器最优设计方案。

关键词: 双向 DC-DC 变换器; 混合储能系统; 高斯混合分布; 多目标优化

DOI: 10.12067/ATEEE2102008

文章编号: 1003-3076(2021)06-0001-10

中图分类号: TM46

1 引言

近年来,电动汽车的发展和应用已经吸引了越来越多的关注,并将会在中国乃至全世界得到推广和应用。能量密度、功率密度和循环寿命是汽车储能系统的三大要求。由于锂电池储能系统在功率密度和循环寿命这两方面存在劣势,学者们提出了能够综合超级电容与锂电池优势的混合储能系统,提高锂离子电池的功率密度和循环寿命^[1-11]。

EV 混合储能系统有主动式、半主动式以及被动式拓扑^[12],其中所有半主动式、全主动式的拓扑均需要一个双向的 DC-DC 变换器来完成对能量输入输出的控制。目前对混合储能系统的研究主要集中于能量分配和容量配置方面^[13-16],没有对于混合储能系统这一特殊情况对 DC-DC 变换器的优化方法作针对性的研究。对于储能系统的变换器设计,首先应当关注的就是变换器的效率问题,因为它不但决定了储能系统的整体效率,还影响着能量分配策略的选择;其次,就是变换器的成本问题,其影响

着储能系统整体投入使用和维护的经济性。

对于 DC-DC 变换器的优化设计,早已有利用各种优化算法,通过改变变换器的器件选择、控制策略以及开关频率等来进行效率和成本优化的研究^[17-22]。由于变换器需要在多种不同的工况下工作,而变换器的性能与其工况密切相关,因此以最佳工况或最差工况所对应的效率评价并不能代表整个工作范围内的变换器性能^[7]。有学者提出利用变换器的负载概率分布来进行具体应用场景的优化。如文献^[7]将 PV 中的 Boost 变换器效率定义成六种不同负载下效率的加权求和,各自的权重根据该功率的工作时间占比决定。受储能系统负载、混合储能容量配置和能量分配策略的影响,EV 混合储能系统 DC-DC 变换器的负载功率变化十分激烈,难以找到可以准确反映变换器性能的单一工况。另一方面,不同于其他工作电压几乎恒定的场合,由于超级电容的电压随 SOC 变化而变化,变换器的工作电压也会在较大范围内变化,变换器性能不仅与负载功率相关,也与超级电容的电压密切相关。因此,为了

收稿日期: 2021-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577074)

作者简介: 黎浩庭(1996-),男,广东籍,硕士研究生,研究方向为 DC-DC 变换器、电动汽车混合储能系统;
王学梅(1972-),女,湖南籍,教授,博士,研究方向为电力电子变流器的可靠性及控制方法。

准确描述变换器的工况,本文提出了包括负载功率与超级电容电压两种变量的二维统计模型来描述变换器的工况。

本文的主要内容如下,首先,建立汽车混合储能系统的模型,并利用 WLTC 标准行车工况和汽车的动力学模型,得到 DC-DC 变换器在低通滤波能量分配策略下负载曲线;然后,对得到的负载分布进行统计学分析,拟合出负载的高斯混合分布;推导了交错并联 DC-DC 变换器的损耗公式。最后,利用高斯混合分布负载下的平均损耗模型和 NSGA-II 算法来优化 DC-DC 变换器的损耗和成本。结果表明,结合负载分布的优化可以进一步降低变换器的平均损耗和成本。

2 混合储能系统结构

2.1 混合储能系统工作原理

半主动式混合储能系统的结构如图 1 示,低通滤波能量分配策略将整车功率需求分为超级电容的功率和电池的功率两部分。控制器根据超级电容的功率指令对双向 DC-DC 变换器发出控制信号,而锂电池组直接并联在直流母线上,提供功率的缺额部分。该拓扑结构可使超级电容在较宽的电压范围工作,可充分利用超级电容的容量来承担峰值功率。同时,并联在直流母线上的锂电池可稳定母线电压。DC-DC 变换器仅需传输储能系统的小部分能量,对储能系统而言能量损耗较小。

2.2 双向变换器主电路

作为混合储能系统的一部分,DC-DC 变换器的优化目标与混合储能系统的性能要求息息相关,高效率 and 低成本是储能系统中非常重要的指标。因此,本文对于混合储能系统中的 DC-DC 变换器,选择效率和成本作为优化的目标函数。考虑到高效率、低成本、能量可双向流动的要求,双向交错并联 Buck/Boost 变换器将是非常适合的拓扑,其主电路如图 2 所示,变换器参数见表 1。

2.3 锂电池组和超级电容模块

混合储能系统采用超级电容的目的在于用其能量来平滑锂电池的输出功率。无论是单体锂电池或者单体超级电容的工作电压都非常低,通常在 1~4 V 之间。对于高电压或者高电流的应用场合,需要分别将大量的锂电池单体、超级电容单体通过串并联组合成锂电池组和超级电容模块。锂电池组和超级电容模块参数见表 2 和表 3。

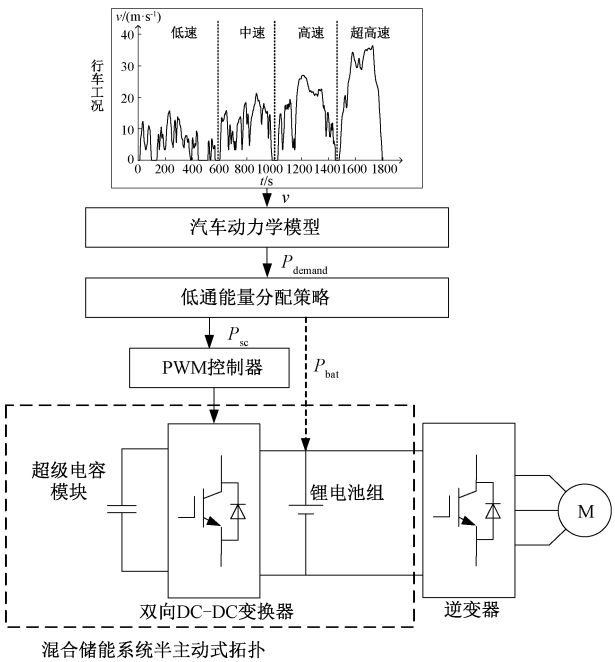


图 1 混合储能系统拓扑

Fig.1 Hybird energy storage system topology

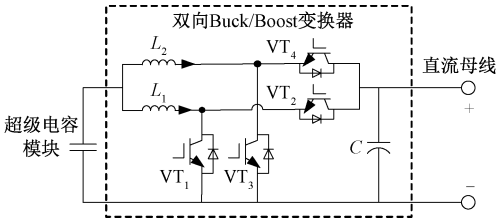


图 2 双向 Buck/Boost 拓扑主电路

Fig.2 Main circuit of bidirectional Buck/Boost converter

表 1 变换器基本参数

Tab.1 Basic parameters of converter

参数	数值
输入侧电压 V_{in}/V	300~600
输出侧电压 V_{out}/V	600
额定功率 P_{max}/kW	30
电感电流纹波率 $\gamma(\%)$	40
电容电压纹波率 $\varphi(\%)$	1

表 2 电池组参数

Tab.2 Parameters of battery cell and battery

参数	数值	参数	数值
单体电压/V	3.2	并联组数/组	1
单体容量/(A·h)	60	电池组电压/V	601.6
单体质量/kg	2	电池组能量/(kW·h)	36.1
串联个数/个	188		

表 3 超级电容单体及模块参数

Tab.3 Parameters of SC unit and SC module

参数	数值	参数	数值
单体电压/V	2.7	串联个数/个	220
单体电容/F	10	并联组数/组	26
单体最大能量/J	36.45	超级电容模块电压/V	594
单体最大电流/A	10.3	超级电容模块电容/F	1.182
单体质量/g	3.2	超级电容模块蓄能/kJ	208.52
单体体积/cm ³	3	串联个数/个	220

本文研究的电动汽车直流母线电压取 600 V, 因此,直接并联于直流母线上的锂电池组需要 188 个 3.2 V 的电池单体串联。双向 Buck/Boost 变换器限制了超级电容模块的电压须低于直流母线侧的电压 600 V,故超级电容模块至多需要 220 个 2.7 V 的超级电容单体串联。超级电容模块需具有一定的储能能力以承担汽车的峰值功率需求,而超级电容达到一定容量后的作用将减弱。本文根据参考文献[11]中超级电容降低储能系统生命周期成本效果的过渡区最优规则,选择 26 组超级电容并联,该组合使超级电容能够承担锂电池的峰值功率,同时又不至于需要投入大量的成本。

过低的超级电容电压将导致输出电流过大,且需要 DC-DC 变换器提供极高的升压比。同时,低电压下超级电容的储能不足。基于上述原因,超级电容模块的 SOC 将被限制在 50 % 以上。

3 变换器负载的高斯混合分布

为了获取变换器工作的负载分布,本文以某混合储能电动汽车在标准行车工况下负载得到 DC-DC 变换器的负载统计分布。

3.1 基于低通滤波的能量分配策略

新欧洲行驶工况(New European Driving Cycle, NEDC)一直作为汽车能耗和排放的测试工况之一。与由多个恒加速度加减速段和匀速段构成的 NEDC 测试工况相比,WLTC 工况由低速、中速、高速和超高速四个部分组成,如图 3 所示。WLTC 工况更加贴近实际车辆行驶环境,已成为我国新标准中的循环测试工况。本文所采用的汽车基本参数如表 4 所示,汽车动力学模型见文献[23]。

为实现两种储能器件之间的功率分配,系统采用低通滤波环节将需求功率分成高频功率和低频功率两部分。超级电容将通过直流变换器输出功率需求中的高频部分,锂电池将向直流母线补充低频功率。低通滤波能量分配策略逻辑如图 4 所示。图 4

中的超级电容 SOC 限制环节将维持电容处于正常的工作电压范围内,而最大功率限制环节可防止变换器电流过载损坏。

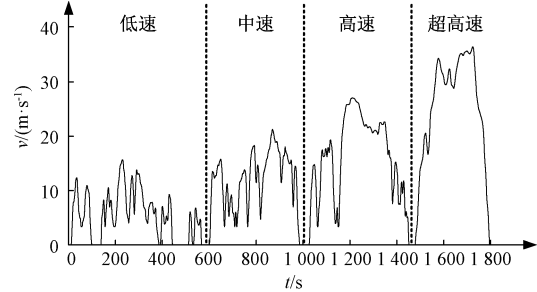


图 3 WLTC 行车工况

Fig.3 WLTC driving cycle

表 4 汽车基本动力参数

Tab.4 Basic parameters of vehicle

参数	数值
汽车质量 m/kg	1 500
重力加速度 $g/(\text{m/s}^2)$	9.8
空气密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	1.225 8
风阻系数 C_D	0.4
迎风面积 A/m^2	2.34
滚动阻力系数 f	0.015
旋转质量换算系数 δ	1.08
传动系统效率 η_t	0.9
逆变器和电机的效率 η_m	0.85

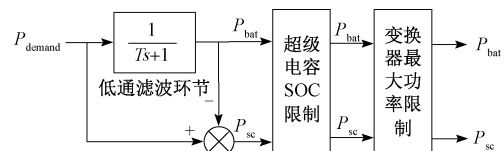


图 4 低通滤波能量分配策略

Fig.4 Energy management strategy based on LPF

本文以最小化锂电池的容量衰减^[24]为目标设计低通滤波环节的时间常数。据此可计算出采用不同滤波时间常数时的一次行车工况下的锂电池容量衰减量,如图 5 所示。

根据图 5 所示的计算结果,本文混合储能系统中的低通滤波环节的时间常数设置为 $T=25$ s。忽略锂电池端电压的变化,在 WLTC 行车工况下,超级电容及锂电池的能量分配如图 6 所示。其中,超级电容初始 SOC 设置为 90 %。

可见,低通滤波能量分配下,功率需求的峰值部分几乎全部由超级电容吸收,锂电池持续提供剩余的低频功率放电电流。超级电容电压在 300~600 V 之间频繁变化,说明了该半主动拓扑能够有效地利

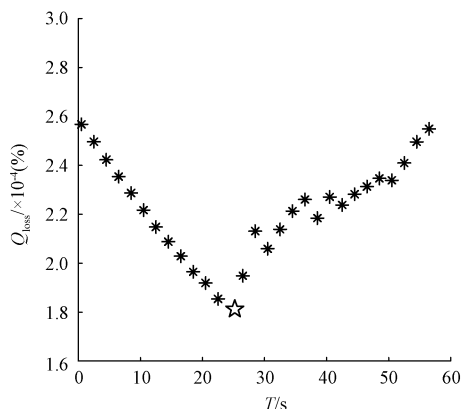
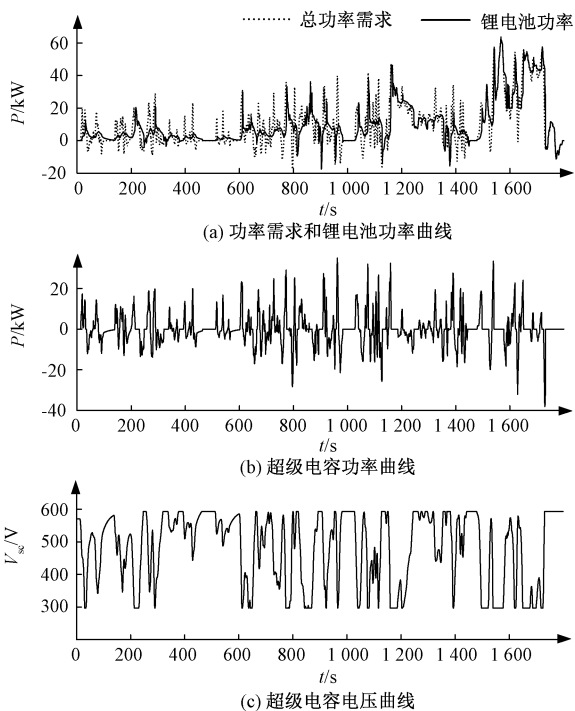
图5 时间常数 T 与电池容量衰减量的关系Fig.5 Relationship between T and battery degradation

图6 低通滤波能量分配结果

Fig.6 Energy distribution based on LPF

用超级电容能量来平滑电池的功率。

3.2 基于高斯混合模型的负载分布

变换器的负载统计分布直方图如图7所示。由图7可见,除了负载功率大小频繁变化之外,超级电容电压,即直流变换器的输入侧电压也频繁变化。为了准确描述变换器的工况,需要采用包括负载功率大小和超级电容电压大小的二维的概率分布模型。工程实际中的负载分布几乎不可能由单一的分

布描述,需要采用混合分布模型。

高斯模型可对任意维数的数据进行概率分布拟

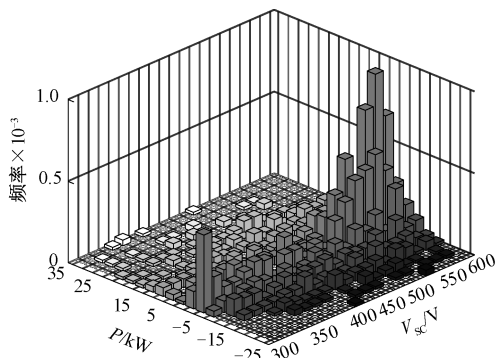


图7 负载分布直方图

Fig.7 Histogram of load distribution

合,且其分布符合常见的各类数据,故其低阶混合模型即可取得非常高的拟合精度。因此对于混合储能系统中直流变换器的工况,非常适合采用二维高斯混合模型。

二维高斯模型的概率密度函数如式(1)所示:

$$f_{2D-GM}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma|}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})\right] \quad (1)$$

式中, \mathbf{x} 为随机变量向量,即超级电容电压和变换器负载功率; $\boldsymbol{\mu}$ 为随机变量的均值向量; Σ 为协方差矩阵。

二维高斯混合分布模型的概率密度函数为多个二维高斯模型的概率密度函数的线性组合,其线性组合的权重之和为1:

$$\begin{cases} f_{2D-GMM}(x_1, x_2) = \sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot f_{2D-GM}(x_1, x_2) \\ \sum_{k=1}^m \alpha_k = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, m 为混合模型的阶数; α_k 为对应第 k 阶的权重。

高斯混合模型的参数估计可通过 EM 算法得到,具体算法原理及步骤可参考文献[25]。本文采用了三阶混合模型,模型分布已经能较好地描述变换器的负载分布情况,没有出现拟合或欠拟合的现象。得到 2D-GMM 参数估计和拟合分布曲面如表5和图8所示。

由表2和图8可知,模型分布主要由三个区域组成,尖峰、窄分布和宽分布。尖峰的权重约30%,电容电压和负载功率分布均值分别为563V和-0.73kW,代表了超级电容处于高SOC但功率几乎

表 5 高斯混合模型的参数估计
Tab.5 Parameter estimation of GMM

子模型	权重 α	均值 $\mu = (V_{sc}, P)^T$	协方差矩阵 Σ
尖峰	0.305 8	562.731 0, -0.733 1	489.71, 4.912 5 4.912 5, 8.398 6
宽分布	0.504 1	481.226 0, 1.224 9	4 416.1, -200.9 -200.9, 144.9
窄分布	0.190 2	346.047 5, -2.133 1	1 457.9, -96.6 -96.6, 39.3

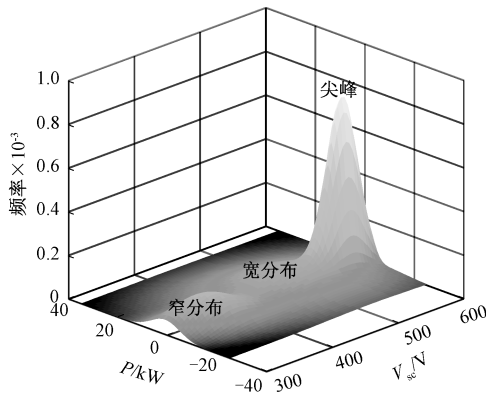


图 8 高斯混合模型拟合曲面

Fig.8 Fitting surface of GMM

为零的满电待机状态;窄分布权重约 20%,该分布下电容电压较低且功率均值为负,代表了超级电容处于低 SOC 且以较低功率持续充电的状态;宽分布为超级电容最普遍的工作状态,权重约占 50%,方差最大。宽分布下,电容 SOC 分布及负载功率范围较广,宽分布代表了超级电容以大功率充放电的状态,且功率均值为正,说明该状态下更多时候为放电。

分布结果揭示出了用于混合储能系统的 DC-DC 变换器的负载特点:长时间工作于低功率充放电的状态,短时间工作于高功率充放电的状态。

4 变换器的损耗模型和成本模型

4.1 优化问题概述

根据混合储能系统的特点,本文的 DC-DC 变换器优化问题以高斯混合分布负载下的平均损耗和变换器成本作为优化目标。

变换器的损耗包括功率半导体器件的损耗、电感损耗、电容损耗以及采样、控制、驱动等电路的损耗,其中功率半导体器件的损耗、电感损耗占主要部分,且与电路的负载大小密切相关,因此需要分析变换器的工作过程以准确计算这部分损耗的大小;而其他损耗占较小部分且变化不大,在优化过程中将

其忽略。考虑到变换器工作的负载变化和输入侧超级电容电压变化,本文采用高斯混合分布负载下平均损耗来作为目标函数:

$$P_{\text{loss_ave}} = \frac{\text{高斯混合分布下总损耗}}{\text{负载分布概率}} = \frac{\int_{V_{sc_min}}^{V_{sc_max}} \int_{P_{min}}^{P_{max}} f_{2D-GMM}(v_{sc}, p) |P_{\text{loss}}| dp dv_{sc}}{\int_{V_{sc_min}}^{V_{sc_max}} \int_{P_{min}}^{P_{max}} f_{2D-GMM}(v_{sc}, p) dp dv_{sc}} \quad (3)$$

式中, $P_{\text{loss_ave}}$ 为行车工况时间内的平均损耗; V_{sc_max} 、 V_{sc_min} 分别为超级电容电压的上、下限; P_{max} 、 P_{min} 分别为变换器输出功率的上、下限; f_{2D-GMM} 为高斯混合模型的概率密度函数; P_{loss} 为变换器在某超级电容电压和负载功率下的功率损耗。

对于本文的变换器设计,仅对主电路建立成本模型,IGBT 将从数据库中选择三种不同的 IGBT 模块。对于电感和电容器成本 θ_L 和 θ_C ,本文通过数据库器件拟合得到目标器件的成本模型。忽略其他控制 IC、基础电路器件的成本。最终的成本目标函数:

$$\theta = 2(\theta_Q + \theta_L) + \theta_C \quad (4)$$

此外,为确保设备的安全稳定运行,应根据设计规范、器件安全工作区域等定义优化问题的约束条件。本文的约束条件包括最大电感电流纹波约束、最大输出电压纹波约束和 IGBT 最大结温约束。完整的优化问题如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \min \quad & G(Y) = (P_{\text{loss_ave}}, \theta)^T \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \Delta I_{\text{max}} \leq \gamma I_{\text{max}} \\ \Delta U_{\text{max}} \leq \varphi U_{\text{out}} \\ T_{j\text{max}} \leq 150 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{where } Y = (Q, f_{sw}, L, C)^T$$

式中, $G(Y)$ 为目标函数向量,包括变换器的平均损耗 $P_{\text{loss_ave}}$ 和主电路器件成本 θ ; Y 为决策变量向量,决策变量包括 IGBT 模块型号 Q 、开关频率 f_{sw} 、电感 L 和电容 C ; ΔI_{max} 、 ΔU_{max} 分别为变换器中可能出现的最大电感电流纹波和最大滤波电容电压纹波; γ 为最大电感电流纹波率约束; φ 为最大输出电压纹波率约束; $T_{j\text{max}}$ 为 IGBT 模块最高结温。

4.2 变换器主电路损耗模型

变换器主电路的损耗 P_{loss} 包括 IGBT 和二极管的导通损耗 $P_{T_{\text{cond}}}$ 和 $P_{D_{\text{cond}}}$ 、开关损耗 $P_{T_{\text{sw}}}$ 和 $P_{D_{\text{sw}}}$ 、电感损耗 P_L 。

$$P_{\text{loss}} = 2(P_{T_{\text{cond}}} + P_{D_{\text{cond}}} + P_{T_{\text{sw}}} + P_{D_{\text{sw}}} + P_L) \quad (6)$$

(1) IGBT 及反并联二极管损耗

IGBT 及反并联二极管损耗包括导通损耗和开关损耗。计算导通损耗时忽略电流纹波,因此导通损耗可由式(7)和式(8)计算:

$$P_{T_{\text{cond}}} = \begin{cases} D \bar{I}_L V_{\text{CE}} & \bar{I}_L \geq 0 \\ (1-D) \bar{I}_L V_{\text{CE}} & \bar{I}_L < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{D_{\text{cond}}} = \begin{cases} (1-D) \bar{I}_L V_F & \bar{I}_L \geq 0 \\ D \bar{I}_L V_F & \bar{I}_L < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, D 为变换器 VT_1 与 VT_3 的占空比; \bar{I}_L 为电感电流的平均值; V_{CE} 和 V_F 分别为 IGBT 和二极管导通时的正向压降。

开关损耗可由式(9)和式(10)计算:

$$P_{T_{\text{sw}}} = (E_{\text{on}} \frac{I_{\text{on}}}{I_{\text{ref}}} + E_{\text{off}} \frac{I_{\text{off}}}{I_{\text{ref}}}) (\frac{V_{\text{bat}}}{V_{\text{ref}}})^{1.35} \cdot [1 + TC_{\text{Esw}}(T_{\text{jT}} - T_{\text{ref}})] f_{\text{sw}} \quad (9)$$

$$P_{D_{\text{sw}}} = E_{\text{rr}} (\frac{I_{\text{rr}}}{I_{\text{ref}}})^{0.6} (\frac{V_{\text{bat}}}{V_{\text{ref}}})^{0.6} \cdot [1 + TC_{\text{Err}}(T_{\text{jD}} - T_{\text{ref}})] f_{\text{sw}} \quad (10)$$

式中, I_{on} 、 I_{off} 、 I_{rr} 分别为 IGBT 开通、关断和二极管关断时的电流; TC_{Esw} 、 TC_{Err} 分别为 IGBT 和二极管开关损耗的温度相关系数; I_{ref} 、 V_{ref} 和 T_{ref} 分别为数据手册中提供的参考电流、电压和温度。

(2) 电感损耗

电感损耗包括因电感直流电阻热效应所产生的铜损以及因磁滞所导致的磁损,本文的电感损耗计算方法参考美磁磁粉芯电感设计手册^[26]。电感损耗如式(11)所示:

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T i_L^2 R_L dt + a B_{\text{pk}}^b f_{\text{sw}}^c \quad (11)$$

式中, R_L 为电感直流电阻; a 、 b 、 c 为与磁心相关的常数,分别取 8.563 9 W/(T^bkHz^c), 1.074, 1.38; B_{pk} 为交流磁通振幅半峰值,取 0.05 T; f_{sw} 的单位为 kHz。

4.3 变换器成本模型

本文所候选的 IGBT 模块均为英飞凌产品,为满足混合储能系统 600 V、30 kW 的要求,额定电压应选用 1 200 V 产品,额定电流分别为 75 A、75 A、150 A,型号分别为 FF75R12YT3 (模块 Q_1)、FF75R12RT4 (模块 Q_2)、FF150R12RT4 (模块 Q_3)。三个 IGBT 模块的价格分别为: $\theta_{Q1} = 260.86$ 元、 $\theta_{Q2} = 330.25$ 元、 $\theta_{Q3} = 439.54$ 元。

精确的电感成本模型可以从磁心、绕线长度、制造人工等方面计算。为简便起见,本文的电感和电

容均通过对成品器件拟合得到电感值或电容值与成本的关系式。成本电感和薄膜电容的成本模型如式(12)所示:

$$\begin{cases} \theta_L = 355.52L + 136.28 \\ \theta_C = 4.72C + 4.05 \end{cases} \quad (12)$$

5 多目标优化流程和结果分析

5.1 多目标优化算法流程

为了在可行的时间内搜索到尽可能全面和近最优的解集,本文的多目标优化求解采用 NSGA-II 算法,其原理可参考文献[28]。NSGA-II 的快速非支配排序和采用拥挤度估计分别可降低算法的时间复杂度和维持种群的多样性,使得个体在帕累托前沿上均匀分布。其次,精英策略的引入可防止获得过的最优解丢失。在合理的参数选择和足够的代数进化后,即可得到目标问题的一个均匀分布的最优解集,如图9所示。

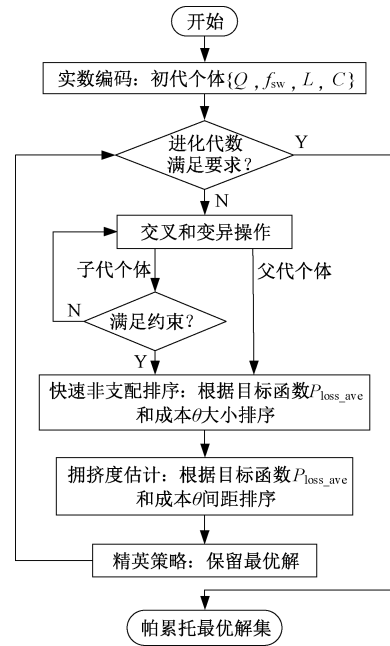


图9 NSGA-II 优化流程图

Fig.9 NSGA-II optimization flow chart

本文多目标优化过程中的基因编码采用实数编码:目标函数分别为平均损耗 $P_{\text{loss_ave}}$ 和变换器成本 θ ;决策变量包括三个 IGBT 模块的选择 $Q \in \{1, 2, 3\}$, 开关频率、电感大小和电容大小 $\{f_{\text{sw}}, L, C\} \in \mathbb{R}^3$ 。算法中的交叉和变异算子分别为模拟二进制交叉算子和多项式变异算子。

5.2 基于高斯混合分布负载的优化结果

图10 分别对不同模块(Q_1 , Q_2 , Q_3)绘出了优化

后的帕累托前沿。

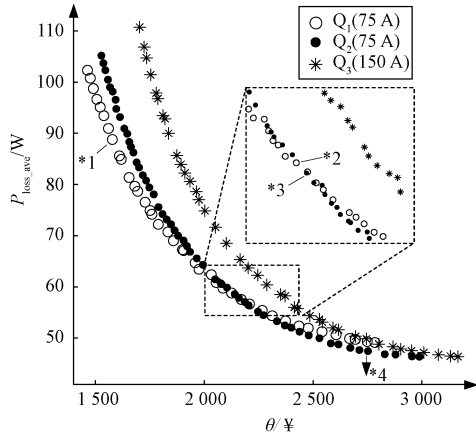


图 10 基于高斯混合分布优化的最优解集
Fig.10 Pareto front of optimization based on GMM distribution

从图 10 中可以看出:①成本和损耗呈近似倒数关系,平均损耗的降低需要以增加成本为代价。②曲线的左上方属于低成本、高能耗区,模块 Q_1 在此区占优;曲线的右下方属于高成本、低能耗区,模块 Q_2 在此区占优。③模块 Q_3 整体位于曲线簇内侧,在成本和损耗两方面均不具优势。

表 6 列出了图 10 的四个帕累托前沿解 *1, *2, *3 和 *4。其中,*1 为在低成本下选用 Q_1 的一个最优解;*2 和 *3 为模块 Q_1 与 Q_2 的帕累托前沿交点处的解;*4 为低损耗下选用 Q_2 的一个最优解。

表 6 基于高斯混合分布优化的结果

Tab.6 Result of optimization based on GMM distribution

标志	模块	频率 /kHz	电感 /mH	电容 / μ F	成本 /¥	平均损耗 /W
*1	Q1	11.65	0.645	71.97	1 596	87.03
*2	Q1	6.95	1.086	121.26	2 143	58.64
*3	Q2	7.73	0.972	108.81	2 140	58.57
*4	Q2	5.00	1.489	169.95	2 798	47.09

表 6 中 4 个解的成本和损耗构成如图 11 所示。可见,成本的增减主要源于电感和电容成本的增减;损耗的变化主要源于电感损耗和开关损耗。

为分析最优解中不同 IGBT 模块构成不同前沿的原因,根据损耗模型绘出了各 IGBT 模块的变换器效率曲线,如图 12 所示。可见,模块 Q_1 的效率在三者中最低;模块 Q_2 则在低载下损耗与模块 Q_3 接近,在重载下损耗大于模块 Q_3 。

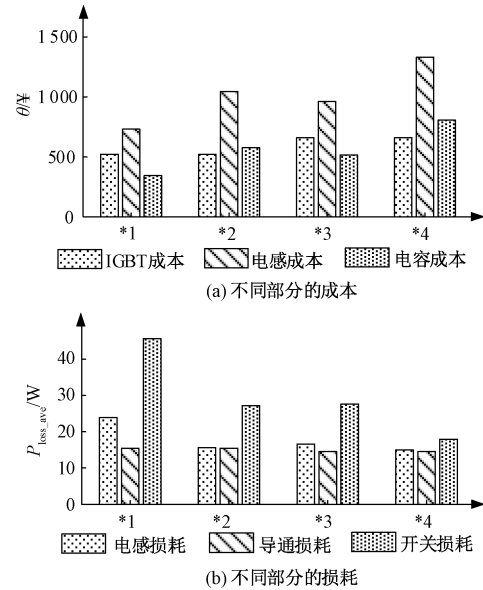


图 11 解 *1, *2, *3, *4 的成本和损耗构成
Fig.11 Costs and power losses of solutions *1, *2, *3, *4

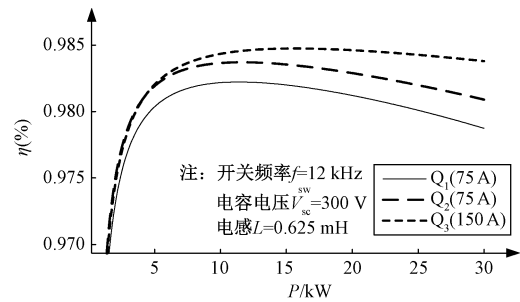


图 12 不同 IGBT 模块的变换器效率曲线
Fig.12 Efficiency of converter with different IGBT

下面将结合上述结果对几个方案展开分析:

(1)在低成本区的解 *1,变换器总成本较低,开关频率较高。低成本区内 IGBT 模块的固定成本占比较大,因此增大电感和电容所导致的成本变化不大。虽然 Q_1 的效率比其他 IGBT 低,但其成本也相对较低,故选用 Q_1 的解集可以选择更低的开关频率以获得与其他模块相当的平均损耗,同时成本更低。因此 Q_1 在低成本区总体占优。

(2)在交界处的解 *2 和解 *3,增大电感和电容带来的成本上升逐渐明显,同时开关损耗占比下降,依靠降低开关频率的损耗降低效果减弱,故 Q_1 的优势减弱。 Q_2 自身的低损耗开始抵消其成本的缺点,故在交界处右侧 Q_2 占优。

(3)在低能耗区的解 *4,总体成本较高,其中电感和电容成本占主要部分,开关频率较低。在低开关频率下,进一步降低开关频率将导致电感和电容的成本急剧上升,但开关损耗降低甚微。故此处

帕累托前沿已接近水平,损耗难以进一步降低。

(4)由高斯混合分布图 8 可知,混合储能系统中的变换器工作负载长期处于低负载条件,短期处于高负载条件,故在此条件下 Q_3 在高负载时的高效率(如图 12 所示)不具优势。

综合上述分析,为了获得损耗和成本两方面均衡的方案,在帕累托前沿曲线低成本到低能耗过渡区的解较为理想。另外,比较 *2 和 *3 可以发现这两个方案的成本和平均损耗一致,而电感和电容更小的方案 *3 显然体积更少,故 *3 为本优化问题一个较为理想的方案。

为了验证基于高斯混合分布优化的效果,本文还设计了一款非基于负载分布优化的变换器作为对比。考虑到额定功率 30 kW 下的效率,根据图 12 所示的变换器效率曲线选定了 IGBT 模块 Q_3 ,并采用损耗 P_{loss} 和成本 θ 优化得到对比变换器的方案 *5。通过仿真运行于 WLTC 工况下的混合储能系统,对比各个变换器的平均损耗和最大损耗,结果如表 7 所示。可见,基于高斯混合分布优化得到的方案可在平均损耗和成本方面同时优于根据效率最大化设计的方案。

表 7 两种方法的结果比较

Tab.7 Comparison results of methods

方案	* 1	* 2	* 3	* 4	* 5
成本/¥	1 596	2 143	2 140	2 798	2 190
理论平均损耗/W	87.03	58.64	58.57	47.09	/
理论最大损耗/W	/	/	/	/	441.84
仿真平均损耗/W	98.36	65.09	65.58	52.00	72.19
仿真最大损耗/W	624.89	500.04	479.24	493.22	436.23

6 结论

本文研究了电动汽车超级电容-锂电池半主动式混合储能系统中的 DC-DC 双向变换器优化设计问题。本文根据变换器在混合储能系统中的工作特点,采用 GMM 模型对变换器的负载功率和超级电容电压进行拟合,得到变换器负载的高斯混合分布。采用 NSGA-II 算法,基于高斯混合负载分布的变换器进行了多目标优化。优化结果表明,考虑变换器工作负载分布的优化方案可以得到平均损耗和成本均更低的方案,进一步提高混合储能系统的能量利用效率。利用多目标优化来辅助变换器设计可直观地体现出不同目标函数之间的冲突关系和不同决策变量取值所带来的影响。

本文还存在不足之处,优化结果仅能提供关于

变换器损耗和器件成本的关系。除上述两者之外,变换器还有许多需要考虑的性能指标,例如,电感大小对变换器体积和动态性能影响、高开关频率所带来的其他问题等,未来将进一步开展这方面的研究。

参考文献 (References):

- [1] Dougal R A, Liu Shengyi, White R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids [J]. IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies, 2002, 25 (1): 120-131.
- [2] Henson W. Optimal battery/ultracapacitor storage combination [J]. Power Sources, 2008, 179: 417-423.
- [3] Allegre A L, Bouscayrol A, Trigui R. Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for traction applications [A]. 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference [C]. Dearborn, MI, USA, 2009. 10928996.
- [4] 王宇 (Wang Yu). 超级电容与蓄电池混合储能系统的能量管理与控制研究 (Study on energy management and control of a supercapacitor and battery hybrid energy storage system) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Harbin: Harbin Institute of Technology), 2016.
- [5] Xiong R, Chen H, Wang C, et al. Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor - A critical review on topology and energy management [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202 (20): 1228-1240.
- [6] 李成, 杨秀, 张美霞, 等 (Li Cheng, Yang Xiu, Zhang Meixia, et al.). 基于成本分析的超级电容器和蓄电池混合储能优化配置方案 (Optimal configuration scheme for hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries based on cost analysis) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2013, 37 (18): 20-24.
- [7] Adinolfi G, Graditi G, Siano P, et al. Multiobjective optimal design of photovoltaic synchronous boost converters assessing efficiency, reliability, and cost savings [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11 (5): 1038-1048.
- [8] Miller J M, Bohn T, Dougherty T J, et al. Why hybridization of energy storage is essential for future hybrid, plug-in and battery electric vehicles [A]. Energy Conversion Congress and Exposition, 2009 [C]. 2009. 10965436.
- [9] Song Z, Li J, Han X, et al. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles [J]. Applied Energy, 2014, 135 (15): 212-224.

- [10] Song Z, Hofmann H, Li J, et al. Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system [J]. *Applied Energy*, 2014, 134 (1): 321-331.
- [11] Song Z, Hofmann H, Li J, et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach [J]. *Applied Energy*, 2015, 139: 151-162.
- [12] Song Z, Hofmann H, Li J, et al. A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles [J]. *Power Sources*, 2015, 274: 400-411.
- [13] Kim M J, Peng H. Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 165 (2): 819-832.
- [14] Jain M, Desai C, Khanna N, et al. Optimal powertrain component sizing of a fuel cell plug-in hybrid electric vehicle using multi-objective genetic algorithm [A]. *Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* [C]. 2009. 11139211.
- [15] Xu L, Ouyang M, Li J, et al. Optimal sizing of plug-in fuel cell electric vehicles using models of vehicle performance and system cost [J]. *Applied Energy*, 2013, 103: 477-487.
- [16] Hung Yi-Hsuan, Wu Chien-Hsun. An integrated optimization approach for a hybrid energy system in electric vehicles [J]. *Applied Energy*, 2012, 98 (1): 479-490.
- [17] Kolar J W, Biela J, Minibock J. Exploring the Pareto front of multi-objective single-phase PFC rectifier design optimization -99.2% efficiency vs. 7kW/dm³ power density [A]. *IEEE International Power Electronics & Motion Control Conference* [C]. 2009. 1-21.
- [18] Visairo H, Medina M A, Ramirez J M. Use of evolutionary algorithms for design optimization of power converters [A]. *International Conference on Electrical Communications & Computers* [C]. 2012. 12695641.
- [19] De Leon-Aldaco S E, Calleja H, Aguayo Alquicira J. Metaheuristic optimization methods applied to power converters: A review [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30 (12): 6791-6803.
- [20] 陈建龙 (Chen Jianlong). 电动汽车的双向 DC-DC 变换器的研究 (Research on bidirectional DC-DC converter of electric vehicle) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Harbin: Harbin Institute of Technology), 2015.
- [21] Vighetti S, Ferrieux J P, Lembeye Y. Optimization and design of a cascaded DC/DC converter devoted to grid connected photovoltaic systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27 (4): 2018-2027.
- [22] Badstuebner U, Biela J, Kolar J W. Design of an 99%-efficient, 5kW, phase-shift PWM DC-DC converter for telecom applications [A]. *Applied Power Electronics Conference & Exposition, IEEE*, 2010. [C]. 2010. 1120473.
- [23] 胡骅, 宋慧 (Hu Hua, Song Hui). 电动汽车 (Electric Vehicle) [M]. 北京: 人民交通出版社 (Beijing: China Communications Press), 2006.
- [24] Wang J, Liu P, Hicks-Garner J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196 (8): 3942-3948.
- [25] 李航 (Li Hang). 统计学习方法 (Statistical learning methods) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2012.
- [26] Magnetics Powder Core Catalog and Design Manual [DB/OL]. https://www.mag-inc.com/Media/Magnetics/File-Library/Product%20Literature/Powder%20Core%20Literature/Magnetics-Powder-Core-Catalog-2017_CN_web.pdf.
- [27] 罗旭, 王学梅, 吴海平 (Luo Xu, Wang Xuemei, Wu Haiping). 基于多目标优化的电动汽车变流器 IGBT 及开关频率的选择 (Selections of IGBTs and switching frequency of the electric vehicle converter based on multi-objective optimization) [J]. *电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society)*, 2020, 35 (10): 2181-2193.
- [28] 公茂果, 焦李成, 杨咚咚, 等 (Gong Maoguo, Jiao Li-cheng, Yang Dongdong, et al.). 进化多目标优化算法研究 (Research on evolutionary multi-Objective optimization algorithms) [J]. *软件学报 (Journal of Software)*, 2009, 20 (2): 271-289.

Optimization of the DC-DC converter for hybrid energy storage electric vehicle base on gaussian mixture distribution

LI Hao-ting, WANG Xue-mei

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Combining the advantages of supercapacitors and batteries, hybrid energy storage system (HESS) can greatly improve the performance of the energy storage system. DC-DC converter in semi-active HESS needs to work in the situation where the load power and input voltage changes dramatically. Therefore, it is hard to find the optimal solution under the actual load condition based on performance evaluation under a single working condition. Considering the reasons above, this paper proposes a multi-objective optimization method of converter parameters based on performance evaluation under actual load distribution. Firstly, the load probability distribution of the converter in the hybrid energy storage system is fitted with the two-dimensional mixed Gaussian distribution model (2D-GMM). Then, the objective functions including average loss and cost are established based on the load probability distribution and loss model of the converter. Finally, NSGA-II algorithm is used to search the Pareto solution set and the reasons for the optimal solution set are analyzed. The optimal converter design based on average loss and cost is given.

Key words: bidirectional DC-DC converter; hybrid energy storage system; Gaussian mixture distribution; multi-objective optimization