

电磁发射电池组杂散电感提取方法*

龙鑫林, 严康为, 鲁军勇, 柳应全, 周仁

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北武汉 430033)

摘要:在电磁发射锂离子电池储能系统中, 电池组杂散电感的准确提取对合理设计系统方案具有重要意义。针对该需求, 对电池组脉冲放电过程进行建模与分析, 得到适合杂散电感提取的放电阶段。通过将离散傅里叶变换求解数值微分的方法更改为滑动窗递推形式, 并与多新息最小二乘算法结合, 从而提出一种可充分利用波形数据的杂散电感提取方法。通过实际的电池组脉冲放电测试波形对该方法进行验证, 结果表明该方法相比传统方法能更加准确、可靠地提取电池组的杂散电感, 在不同放电电流下的提取结果具有很好的 consistency。

关键词:电磁发射; 电池组; 杂散电感; 数值微分; 多新息

中图分类号: TM153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2021)04-044-09

Stray inductance extraction method for battery pack in electromagnetic launch

LONG Xinlin, YAN Kangwei, LU Junyong, LIU Yingquan, ZHOU Ren

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In a lithium-ion battery energy storage system for electromagnetic launch, the accurate extraction of the battery pack stray inductance is significant for designing a reasonable system solution. To meet this demand, the process of battery pack pulse discharge was modeled and analyzed, and the discharge stage suitable for stray inductance extraction was obtained. The method of solving the numerical differentiation by discrete Fourier transform was changed to the sliding-window recursive form, which was combined with multi-innovation least square algorithm, so a novel stray inductance extraction method was proposed, which can make full use of waveform data. Experimental results show that this method can extract stray inductance more accurately and reliably than the traditional method, and the calculation results are consistent under different discharge currents.

Keywords: electromagnetic launch; battery pack; stray inductance; numerical differentiation; multi-innovation

电磁发射技术作为一种利用电磁力加速物体的先进发射技术, 因具备发射动能大、发射速度快、发射效率高、可控性强等优势, 广泛应用于飞机弹射、武器发射、火箭弹射等领域^[1-2]。为保障发射装置工作时的频繁大功率脉冲电能供应, 常在电网与用电设备之间增加锂离子电池储能环节, 发挥能量缓冲以及功率放大的作用^[3-4]。

用于电磁发射的电池储能系统需要数千节电池的串并联使用, 以满足发射装置的电压、电流需求。在大量连接件以及电池自身寄生参数的作用下, 电池组在充放电瞬态过程中会呈现出明显的电感特性。如果在系统设计时对该杂散电感的取值不当, 会影响电池组放电时的能量传输速率^[5], 并造成绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate

Bipolar Transistor, IGBT)关断过程中电压应力过大^[6]、保护装置的分断时间过长^[7]等问题, 进而影响发射指标和装置寿命, 严重时甚至导致器件失效以及火灾的发生。因此, 准确提取电池组杂散电感, 对电磁发射电池储能系统的精确设计具有非常重要的意义。

近年来关于杂散电感的提取方法已有相关的研究, 多集中于电力电子领域的母排及换流回路杂散电感上, 根据提取的方式可分为计算法、信号分析法及瞬态波形分析法三类。计算法通过构造解析式^[8]、三维有限元^[9-10]、部分单元等效电路^[11-12]等途径对待测物体完成精细化建模和电感估算, 难以运用于结构庞大、材料组成复杂的电池组。信号分析法需要对待测对象施加时域^[13]

* 收稿日期: 2020-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51925704, 51877214, 51607187, 51907203); 湖北省自然科学基金资助项目(2019CFB371, 2019CFB373); 中国博士后特别资助基金项目(2019T120972)

作者简介: 龙鑫林(1982—), 男, 湖南株洲人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, E-mail: longxinlin1982@163.com

或频域^[14-15]信号,适合测量无源或电压较低的小型有源设备,对端电压数百伏甚至数千伏的大容量电池组并不适用。瞬态波形分析法利用电感的伏安特性,通过分析包含待测对象的电路在开通与关断的瞬态过程中的电压、电流波形,从中得到所需的电感值^[16],是目前针对电池组的参数提取非常有效的方式。

文献[17]利用回路导通瞬间的电压跌落除以电流变化率,实现了铅酸电池组的杂散电感提取,但其分析过程中需要求解瞬态电流变化率这一微分量,数值计算时受噪声信号影响难免带来较大的误差。文献[18]运用电感的伏安关系积分式,从而避免了微分运算,提高了参数提取的准确性。文献[19]在积分法的基础上引入了杂散电阻和测量偏置两个影响因素,进一步提高了积分法的准确程度。文献[20]提出了一种开关振荡频率法,该方法需要在测试电路特定位置插入分立电容,具有一定的局限性。

本文针对电磁发射电池组杂散电感需要精确提取的要求,首先建模分析了电池组脉冲放电的过程,寻找到适合杂散电感提取的阶段,随后提出采用滑动离散傅里叶变换(Sliding Discrete Fourier Transform, SDFT)微分算法结合多新息最小二乘(Multi-Innovation recursive Least Squares, MILS)算法的方式提取杂散电感。最后,利用电池组的脉冲放电测试波形对该方法完成验证,并与传统方法进行比较,证明了该方法的有效性与准确性。

1 电池组脉冲放电过程的建模与分析

大容量锂离子电池组的电池数目庞大,且每节电池的端电压与放电电流呈现出复杂的时变非线性关系,难以实现每块电池的精细建模。在仅了解电池组整体电路特性的前提下,可借鉴单体电池分析常用的电路模型思路,并针对电池成组后的状态变化进行扩展。图1为包含了电池组电路模型的脉冲放电测试电路示意图,由锂离子电池组、放电开关及测试负载三部分组成,其中电池组模型采用传统的二阶RC电路模型^[21-22]与电感 L_0 串联的形式。

图1中: U_{ocv} 为锂离子电池组的开路电压(Open Circuit Voltage, OCV),随各节电池荷电状态(State Of Charge, SOC)的改变而变化; R_0 为欧姆内阻,表征电池组端电压 U 的变化量与放电电流 I 呈现欧姆线性相关的成分; L_0 为电池组杂散电感,用于表示电池组输出呈现出的电感特性; R_p 、 C_p 并联组成电化学反应项,对应的电池组端

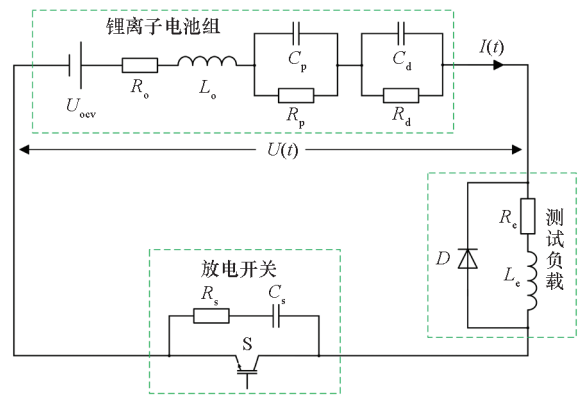


图1 测试电路示意图

Fig. 1 Schematic circuit of testing

电压受每节电池电荷转移步骤的影响, R_d 、 C_d 并联组成浓差极化项,对应的电池组端电压受每节电池的锂离子液相及固相扩散过程的影响; R_c 、 L_c 、 D 均为测试负载参数, R_s 、 C_s 为开关S缓冲电路的吸收电阻和吸收电容。

开关S闭合后电池组端电压 U 及放电电流 I 的波形示意图如图2所示。其中, U_{0-} 、 U_{0+} 分别为 U 在 t_0 时刻之前及之后的值, U_1 、 U_2 分别为 U 在 t_1 、 t_2 时刻的值, I_0 、 I_1 、 I_2 分别为 I 在 t_0 、 t_1 、 t_2 时刻的值。

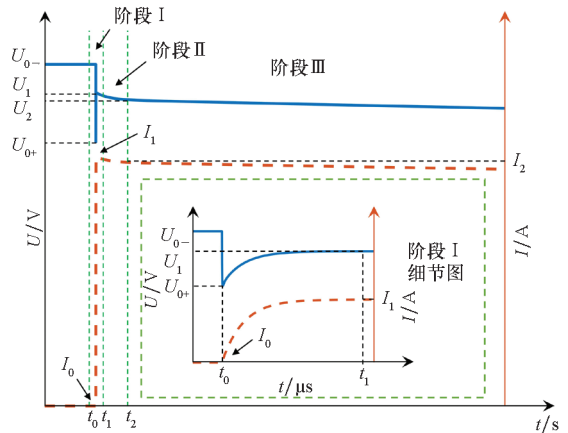


图2 脉冲放电波形示意图

Fig. 2 Sketch of pulse discharge waveforms

根据图2波形的特点,可将电池组脉冲放电过程分为三个阶段:阶段I($t_0 \sim t_1$)期间,电池内部的极化过程还未开始,此时电池组等效电路可视为如图3(a)所示的电压源、电阻、电感串联的形式,放电电流从 I_0 逐渐上升至 I_1 ,端电压在内外电感的分压作用下先跌落至 U_{0+} 后逐渐回升到 U_1 。阶段II($t_1 \sim t_2$)期间,受电极反应速率的限制,电池负极的电子逐渐流失、正极的电子不断集聚,导致端电压逐渐下降,各节电池进入电化学极化状态,此时电池组等效电路如图3(b)所示,由

于放电电流下降缓慢,此阶段电感分压可忽略不计。阶段Ⅲ(t_2 之后)期间,锂离子在电解液及电极材料内部的缓慢扩散过程成为遏制电池放电的控制步骤,端电压从 U_2 开始进一步下降,电池处于浓差极化状态,此时电池组等效电路如图 3(c)所示,此阶段放电电流同样下降缓慢,电感分压可忽略不计。

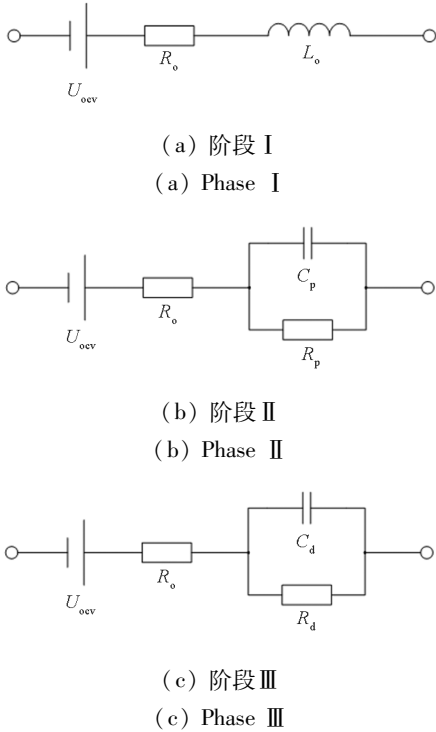


图 3 脉冲放电过程等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of pulse discharge process

从以上三个阶段的分析中可看出,阶段Ⅰ的电池组放电电流变化明显且端电压不受电池极化作用的影响,适合从中提取杂散电感。此外,由于阶段Ⅰ的持续时间为百微秒至毫秒量级,在此期间各节电池的 SOC 几乎未发生变化,因此开路电压 U_{ocv} 可视为恒定值,根据 U_{0-} 确定。由此,可得阶段Ⅰ的电池组端电压 U 与放电电流 I 的关系式:

$$U(t) = U_{0-} - R_0 I(t) - L_0 \frac{dI(t)}{dt} \quad (1)$$

2 基于瞬态波形分析的杂散电感提取

2.1 传统杂散电感提取方法

2.1.1 变分法

开关 S 闭合瞬间,电池组初始放电电流 I_0 可近似为 0,欧姆内阻 R_0 几乎不分压,但初始电流变化率 dI_0/dt 很大,因此电池组端电压的瞬间跌落完全由杂散电感 L_0 引起,可据此得到 L_0 的微分计算公式:

$$L_0 = \frac{U_{0-} - U_{0+}}{dI_0/dt} \quad (2)$$

由于该公式存在微分量 dI_0/dt ,实际计算过程中针对离散数据需要将其近似为差分运算 $\Delta I_0/\Delta t$,并选择合适的 Δt ,以降低高频噪声对计算结果的影响。由于过长或过短的 Δt 均会严重影响计算结果,因此该方法往往需要多次迭代才能得到较为理想的电感值。

2.1.2 积分法

为避免高频噪声的影响,积分法利用电感的伏安关系积分式,对式(1)在整个阶段Ⅰ进行积分,从而得到杂散电感 L_0 的积分计算公式:

$$L_0 = \frac{U_{0-}(t_1 - t_0) - \int_{t_0}^{t_1} U(t) dt - R_0 \int_{t_0}^{t_1} I(t) dt}{I_1 - I_0} \quad (3)$$

由于 t_1 时刻放电电流的变化率 dI_1/dt 较小,此时电感 L_0 的分压可忽略不计,因此式(3)中的欧姆内阻 R_0 可近似为:

$$R_0 \approx \frac{U_{0-} - U_1}{I_1} \quad (4)$$

积分法相比变分法更加充分地运用了阶段Ⅰ的电压、电流数据,积分过程部分消除了高频纹波的干扰,但计算过程仍然需要借助 I_0 、 I_1 、 U_1 这些瞬态值,因此当电路噪声情况较为复杂时,参数提取结果依然会受到较大的影响。

2.2 SDFT 微分结合 MILS 的杂散电感提取

从以上两种分析方法中可看出,瞬态波形分析法的难点在于如何充分地运用波形数据以及如何避免微分量扩大噪声干扰。针对波形数据的充分运用,可引入递推最小二乘 (Recursive Least Squares, RLS) 算法,基于最小二乘原理从而降低噪声信号对求解结果的影响。MILS 算法作为 RLS 算法的优化形式,具有更快的收敛速度^[23],可以保证当阶段Ⅰ采集的数据量较少时仍能实现辨识结果的充分收敛,因此更适合用于杂散电感的提取。

针对微分量易受噪声影响的问题,可在 MILS 提取杂散电感之前先进行微分运算的预处理,从而将微分量本身作为 MILS 的输入。经过分析,本文对现有的一种离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 求解数值微分的方法进行改进,使其可以快速地计算电流变化率这一微分量。

2.2.1 SDFT 微分算法

DFT 求解数值微分的基本思想是利用离散

傅里叶变换将测量得到的时域信号转换为频域信号,在频域下完成微分和滤波的操作,再将微分结果反变换回时域,从而有效降低噪声信号对微分结果的干扰^[24-25]。由于 DFT 求解数值微分的过程涉及傅里叶变换及其逆变换,时间复杂度高达 $o(N^3)$,直接计算耗时极长,因此本文通过添加滑动窗^[26-27]以及固化过滤时间常数的途径,将这一过程更改为递推运算,大大降低了运算量。

给定一段采样间隔为 T 的离散信号序列 $\{x_m\}$,以第 m 位置处的数据为中心添加宽度 $D = 2N + 1$ 的矩形窗,即提取 $\{x_{m-N}, x_{m-N+1}, \dots, x_m, \dots, x_{m+N-1}, x_{m+N}\}$ 共 D 个数据作为第 m 位置的样本序列,则通过离散傅里叶变换可将该时域序列转换为频域形式 $X_k (k = 0, \dots, D-1)$:

$$X_k = \sum_{n=0}^{D-1} x_{m-N+n} W^{kn} \quad (5)$$

其中, $W = \exp(-j2\pi D^{-1})$ 。

根据 DFT 的时域差分性质可知, x_m 的时域微分 \dot{x}_m 在频域下与原信号满足如下关系:

$$\dot{X}_k = \frac{1}{T}(1 - W^k)X_k \quad (6)$$

由于干扰噪声以及非周期信号所带来的频谱泄漏均处在较高频段,对 \dot{X}_k 采取低通滤波,即:

$$\dot{X}'_k = \lambda_k \dot{X}_k \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} \lambda_k = 0 & D/\tau < k < D - D/\tau \\ \lambda_k = 1 & k \leq D/\tau, k \geq D - D/\tau \end{cases}$$

τ 为过滤时间常数。

对 \dot{X}'_k 进行反傅里叶变换可得:

$$\dot{x}_m = \frac{1}{D} \sum_{k=0}^{D-1} \dot{X}'_k W^{-kN} \quad (8)$$

整理式(5)~(8),得到利用 DFT 微分算法求解信号 x_m 数值微分的公式:

$$\dot{x}_m = \frac{1}{DT} \sum_{k=0}^{D-1} [\lambda_k (1 - W^k) \sum_{n=0}^{D-1} x_{m-N+n} W^{k(n-N)}] \quad (9)$$

观察式(9)可知,DFT 微分算法需要二重求和才能计算离散信号在第 m 位置的数值微分,为提高计算速度,需要对其进行简化,并且更改为递推形式。

由式(6)及 DFT 的共轭对称性可知:

$$\begin{cases} \dot{X}'_0 = 0 \\ \dot{X}'_{D-k} = \dot{X}'_k \end{cases} \quad (10)$$

其中, $k = 1, \dots, D-1$ 。

令 $\tau = D$,结合式(7)、式(10)可得:

$$\begin{cases} \dot{X}'_1 = \dot{X}'_1 \\ \dot{X}'_{D-1} = \dot{X}'_1 \\ \dot{X}'_k = 0 \quad k \neq 1, D-1 \end{cases} \quad (11)$$

根据式(8)、式(11)以及 DFT 的隐含周期性可发现,当信号的最高有效频率分量 $f_{\max} \leq 1/(20DT)$,即 $D \leq 1/(20f_{\max}T)$ 时,信号 x_m 的数值微分近似满足:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &\approx \frac{1}{2D} [\dot{X}'_1 W^{-N} + \dot{X}'_{2N} W^{-N(D-1)}] \\ &= \frac{1}{2D} [\dot{X}'_1 W^{-N} + \dot{X}'_1 W^{-N(D-1)}] \end{aligned} \quad (12)$$

考虑到

$$W^{-N(D-1)} = e^{j\frac{2\pi N}{D} - j2\pi N} = e^{j\frac{2\pi N}{D}} = W^{-N} \quad (13)$$

因而,式(12)可简化为:

$$\dot{x}_m \approx \text{Re}[\sigma \dot{X}'_1(m)] \quad (14)$$

其中, Re 表示实部 $\sigma = D^{-1}W^{-N}$ 。

由式(5)、式(6)可知,以第 m 位置为中心添加宽度为 D 的矩形窗时, $\dot{X}'_1(m)$ 满足:

$$\dot{X}'_1(m) = \frac{1}{T}(1 - W) \sum_{n=0}^{D-1} x_{m-N+n} W^n \quad (15)$$

因此,当矩形窗的中心滑动至第 $m+1$ 位置时, $\dot{X}'_1(m+1)$ 满足:

$$\dot{X}'_1(m+1) = \frac{1}{T}(1 - W) \sum_{n=0}^{D-1} x_{m+1-N+n} W^n \quad (16)$$

通过式(15)、式(16),可得到 $\dot{X}'_1(m)$ 与 $\dot{X}'_1(m+1)$ 有以下关系:

$$\dot{X}'_1(m+1) = \alpha \dot{X}'_1(m) + \beta_1 x_{m+N+1} - \beta_2 x_{m-N} \quad (17)$$

其中: $\alpha = W^{-1}$, $\beta_1 = T^{-1}W^D(W^{-1} - 1)$, $\beta_2 = T^{-1}(W^{-1} - 1)$ 。

整理以上推导结果,可总结 SDFT 微分算法求解长度为 L 、采样间隔为 T 的离散信号序列 $\{x_m\}$ 的数值微分的具体流程如图 4 所示。

2.2.2 MILS 提取杂散电感

通过 SDFT 微分算法计算出电流变化率后,即可采用 MILS 算法提取杂散电感。传统的 RLS 算法作为最小二乘(Least Squares, LS)算法的递推形式,本质上是一种自适应滤波算法,其原理是针对当前输入量 \mathbf{x}_k ,通过自适应调整估计参数 $\hat{\mathbf{w}}$,使当前实际观测值 d_k 与模型估计值 $\mathbf{x}_k^T \hat{\mathbf{w}}_{k-1}$ 相减

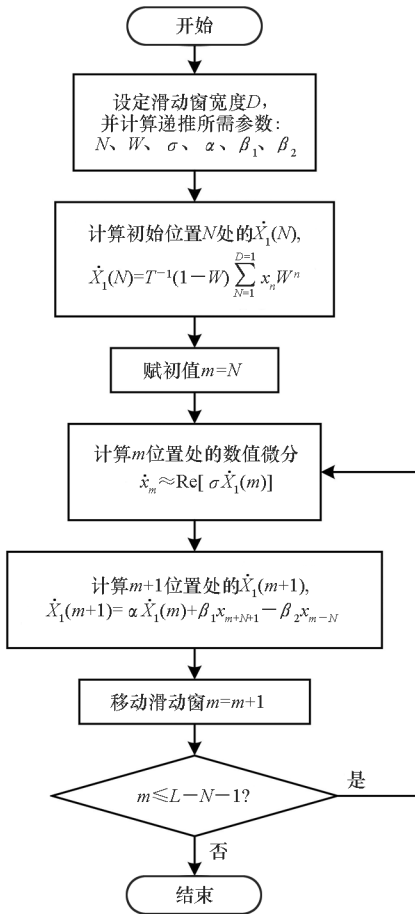


图 4 SDFT 微分算法流程图

Fig. 4 Flow chart of SDFT differential algorithm

得到的新息 $e_k = d_k - \mathbf{x}_k^T \hat{\mathbf{w}}_{k-1}$ 的平方和最小, 从而提取与实际相匹配的 $\hat{\mathbf{w}}$ 。

传统 RLS 算法的递推过程如下:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_k (\lambda + \mathbf{x}_k^T \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_k)^{-1} \\ \mathbf{P}_k = \lambda^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{x}_k^T) \mathbf{P}_{k-1} \\ e_k = d_k - \mathbf{x}_k^T \hat{\mathbf{w}}_{k-1} \\ \hat{\mathbf{w}}_k = \hat{\mathbf{w}}_{k-1} + \mathbf{K}_k e_k \end{cases} \quad (18)$$

其中, \mathbf{K}_k 为增益向量, \mathbf{P}_k 为协方差矩阵, λ 为遗忘因子, \mathbf{I} 为单位矩阵。

MILS 算法是基于多新息理论, 在传统的 RLS 算法的基础上将单一新息 e_k 扩展为包含历史数据的多新息 E_k , 从而更充分地利用新息数据, 提高了收敛速度, 进而在数据量不充分的情况下仍能保证较高的参数提取精度。

MILS 算法求取多新息的公式为:

$$E_k = \sum_{n=0}^{\min(p-1, k-1)} (d_{k-n} - \mathbf{x}_{k-n}^T \hat{\mathbf{w}}_{k-1}) \quad (19)$$

其中, p 为新息长度。

将式 (18) 中的单一新息 e_k 替换为多新息 E_k , 即可得 MILS 算法的递推过程为:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_k (\lambda + \mathbf{x}_k^T \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{x}_k)^{-1} \\ \mathbf{P}_k = \lambda^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{x}_k^T) \mathbf{P}_{k-1} \\ E_k = \sum_{n=0}^{\min(p-1, k-1)} (d_{k-n} - \mathbf{x}_{k-n}^T \hat{\mathbf{w}}_{k-1}) \\ \hat{\mathbf{w}}_k = \hat{\mathbf{w}}_{k-1} + \mathbf{K}_k E_k \end{cases} \quad (20)$$

针对杂散电感的提取, 将式 (1) 离散化, 即:

$$U_{0-} - U_k = R_0 I_k + L_0 \dot{I}_k \quad (21)$$

定义参数 $\hat{\mathbf{w}} = [R_0 \ L_0]^T$, 输入量 $\mathbf{x}_k = [I_k \ \dot{I}_k]^T$, 观测值 $d_k = U_{0-} - U_k$, 则可基于电池组脉冲放电过程阶段 I 采集的端电压 U 及放电电流 I , 则可利用式 (20) 进行 MILS 参数辨识。提取 $\hat{\mathbf{w}}$ 的最终收敛值中, 第二项 L_0 即为电池组的杂散电感。

3 测试过程及提取结果

3.1 电池组脉冲放电测试

为验证杂散电感提取方法的准确性, 搭建如图 1 所示的电池组脉冲放电测试电路。其中, 锂离子电池组由额定容量 50 Ah、开路电压约 3.3 V、最大安全放电电流 250 A 的单节电池以 8 并 100 串的方式连接而成, 成组后的端电压约 330 V, 最大安全放电电流 2 000 A。测试负载为 1 MW 水冷电阻反并联续流二极管, 杂散电感 L_e 小于 30 μH , 可通过增加内部并联数的方式改变电阻值, 从而实现电池组的放电电流调节。放电开关采用 2 个 3 300 V/1 200 A 的 IGBT 模块并联, 吸收阻容 R_s 、 C_s 分别为 10 Ω 、15 μF 。电压测量采用高压差分探头 (HVD3605), 带宽为 100 MHz, 精度为 $\pm 1\%$; 电流测量采用钳形传感器 (CT7642), 带宽为 10 kHz, 精度为 $\pm 0.5\%$; 由于电流测量相比电压测量有较大延迟, 因此需要将电流波形前移固定时长 (50 μs), 以确保电压、电流波形变化的起始点基本一致。

在最大安全放电电流 (2 000 A) 以下对电池组进行脉冲放电测试, 图 5 为 200 ~ 2 000 A 共 10 个放电等级下阶段 I 的端电压、放电电流测试波形, 可看出, 随着放电等级的依次提升, 端电压跌落最低值 U_{0+} 依次下降, 其原因是为满足较高电流等级的放电输出, 测试负载内部并联数逐渐增多, 负载的等效杂散电感 L_e 因此逐渐减少, 在端电压跌落过程中相比电池组内部电感 L_0 的分压减小, 最终造成了 U_{0+} 的下降。

3.2 杂散电感提取过程及结果

利用 SDFT 微分算法计算放电电流变化率,

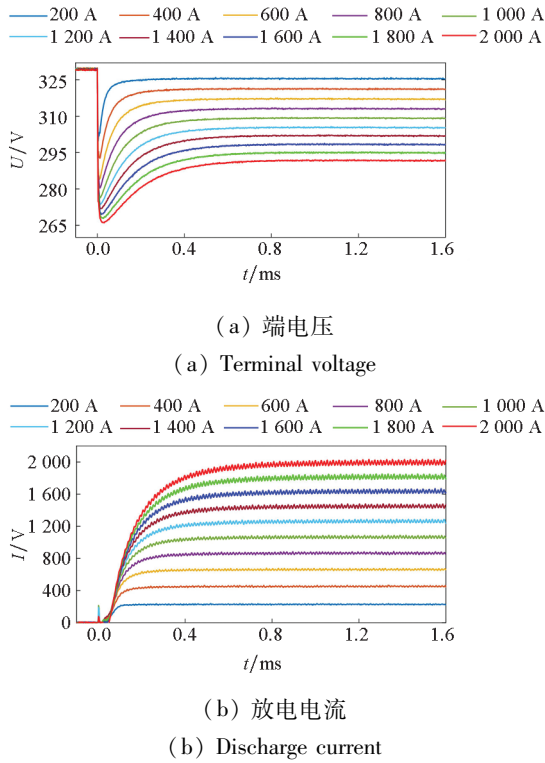


图5 阶段 I 的测试波形

Fig. 5 Testing waveforms of stage I

以 2 000 A 放电等级为例,图 6 所示为不同滑动窗宽度 D 下的求解结果,其中采样间隔 $T = 0.1 \mu\text{s}$ 。当 D 较小时,由 SDFT 得到的频谱较为稀疏,部分干扰噪声存在于基波频率以下,造成求解的电流变化率曲线仍有较大波动。随着 D 的增大,频谱变得密集,大部分噪声被有效地滤除,最终求解结果也变得更加平滑。由于 D 的提高会造成初始中心位置 N 向后移动,也即 $0 \sim N$ 位置处的电流变化率无法有效地求解,综合考虑后选取 $D = 501$ 。图 7 为运用 SDFT 微分算法求解的 10 个放电等级下的电流变化率曲线,可看出,由

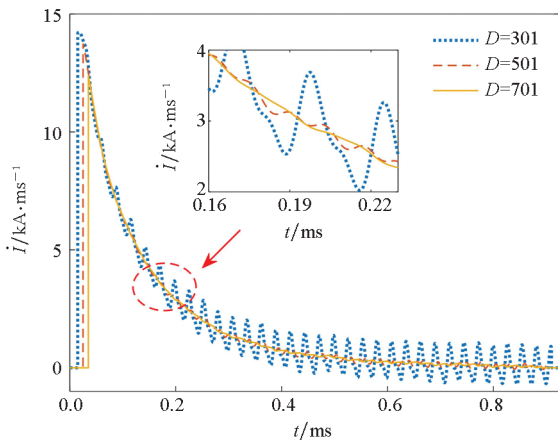


图 6 不同滑动窗宽度下的电流变化率曲线
Fig. 6 Curves of current change rate under different sliding window width

于负载电感值的降低,大电流下的初始电流变化率也会明显增大。

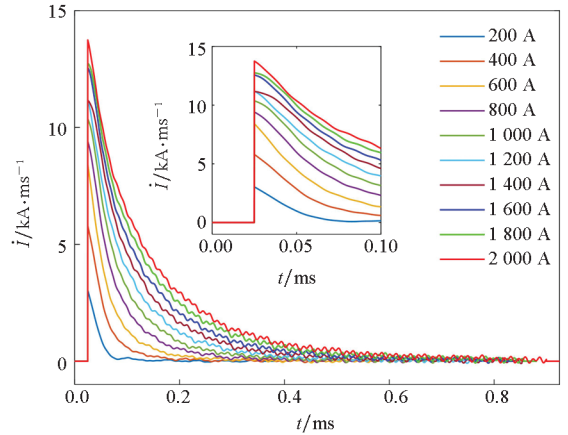


图 7 不同放电电流等级下的电流变化率曲线
Fig. 7 Curves of current change rate under different discharge current levels

将电流变化率曲线与端电压、放电电流波形代入 MILS 算法中提取电池组杂散电感,以阶段 I 持续时间最短的 200 A 放电等级为例(阶段 I 持续时间 $384.5 \mu\text{s}$,共采样 3 845 个数据点),图 8 为不同新息长度 p 下的杂散电感参数收敛曲线。当 $p = 1$,即采用传统的 RLS 算法时,由于收敛速度较慢,因此直到阶段 I 的末期参数仍未充分收敛。随着 p 的增加,阶段 I 的收敛速度明显加快。考虑到过长的新息长度 p 会增加较多的运算时间,此处选择 $p = 10$ 。

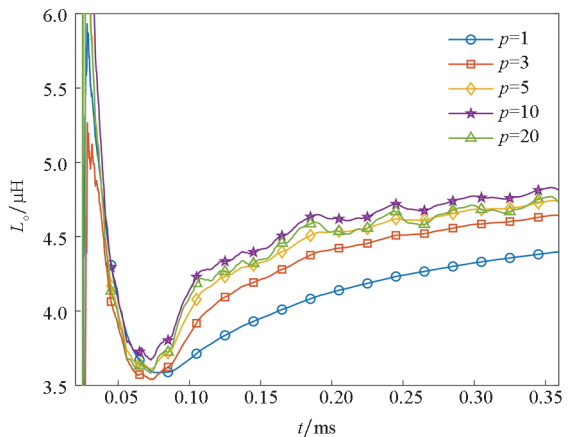


图 8 杂散电感参数收敛曲线
Fig. 8 Parameter convergence curves of the stray inductance

针对 200 ~ 2 000 A 共 10 个放电等级的电池组脉冲放电波形,分别运用变分法、积分法、SDFT 微分结合 RLS 以及 SDFT 微分结合 MILS 四种方法计算杂散电感,计算结果如表 1 所示。

表 1 杂散电感计算结果

Tab. 1 Calculation results of stray inductance

放电 电流/A	电池组杂散电感/ μH			
	变分法	积分法	SDFT 微分 + RLS	SDFT 微分 + MILS
200	10.60	6.79	4.40	4.82
400	6.96	6.11	4.67	4.93
600	4.82	5.57	4.65	4.78
800	5.23	5.79	4.70	4.82
1 000	4.41	5.69	4.77	4.86
1 200	4.34	5.60	4.93	4.99
1 400	5.33	5.88	4.96	5.01
1 600	5.20	5.58	4.90	4.91
1 800	4.37	5.63	4.96	4.98
2 000	5.19	5.31	4.98	4.93

3.3 计算结果分析

图 9 为根据表 1 绘制的不同放电电流下杂散电感的提取结果,可看出,传统方法在不同放电电流下提取的杂散电感值波动较大,即使去除明显异常的 200 A、400 A 数据,变分法和积分法的剩余 8 次计算结果仍分别有 8.9%、3.0% 的相对标准偏差。通过 SDFT 微分结合 RLS 的方式可得到较为一致的杂散电感值,但由于低电流下阶段 I 的持续时间较短,波形数据量较少 (< 5 000 点),因此参数收敛不够充分,依然有 2.7% 的偏差。而 SDFT 微分结合 MILS 由于参数收敛充分,因此提取结果在不同放电电流下呈现出很好的一致性,10 次计算结果的算术平均值为 4.90 μH ,相对标准偏差为 1.6%。

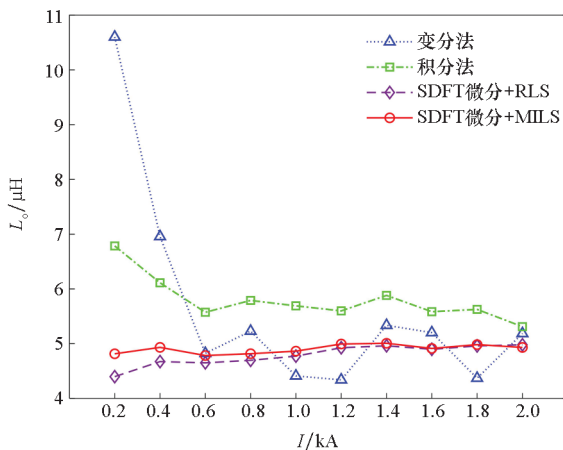


图 9 杂散电感变化曲线

Fig. 9 Variation curves of stray inductance

图 10 为对应的欧姆内阻提取情况。其中,积

分法 10 次提取结果的算数平均值为 18.93 $\text{m}\Omega$,相对标准偏差为 1.0%;SDFT 微分结合 RLS 的提取结果由于参数收敛不充分,因此相对积分法的提取结果整体偏大,且 10 次提取结果有 3.0% 的偏差;而 SDFT 微分结合 MILS 的 10 次提取结果算数平均值为 18.99 $\text{m}\Omega$,与积分法相当,相对标准偏差为 0.76%,略好于积分法。

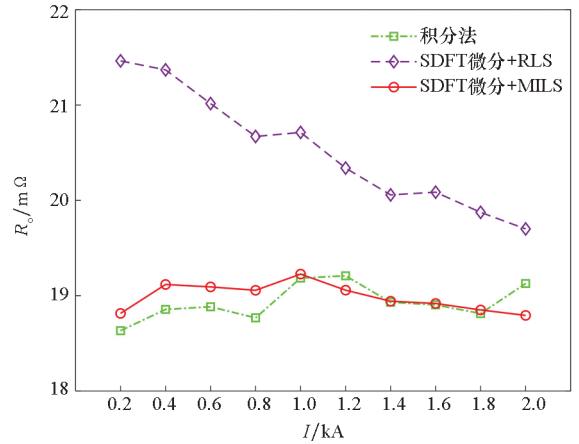


图 10 欧姆内阻变化曲线

Fig. 10 Variation curves of Ohmic resistance

对于传统方法在低电流下有很大偏差的原因,经分析,是电池组的脉冲放电受外部电路杂散参数的影响,在开关导通时会出现如图 11 所示的波动,从而造成变分法计算所需的初始电流变化率 dI_0/dt 以及积分法计算所需的初始放电电流值 I_0 受到较大干扰。

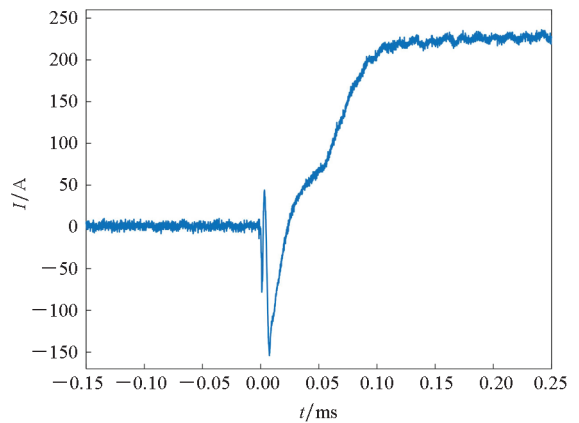


图 11 低电流下阶段 I 的放电电流波形

Fig. 11 Discharge current waveform of stage I at low current

4 结论

本文以电磁发射电池组为研究对象,对锂离子电池组的脉冲放电过程进行建模分析,采用 SDFT 微分算法结合 MILS 算法的方式实现了电

池组杂散电感的提取,并得出以下结论:

1) 本文方法能充分地利用瞬态波形数据,从而有效地避免了受噪声干扰的瞬态值对提取结果造成影响。实验结果证明,本文方法在不同放电电流下的杂散电感提取结果呈现出很好的一致性,即使在电流较低时仍能保证杂散电感的准确提取。

2) 在电池组脉冲放电的初期,放电电流快速上升,伴随着端电压的瞬间跌落和回升,由于该阶段电感特性明显且电池极化作用还未显现,因此适合杂散电感的提取。

参考文献 (References)

- [1] 马伟明, 鲁军勇, 李湘平. 电磁发射超高速一体化弹丸[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 1-10.
MA Weiming, LU Junyong, LI Xiangping. Electromagnetic launch hypervelocity integrated projectile [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 1-10. (in Chinese)
- [2] MA W M, LU J Y. Thinking and study of electromagnetic launch technology [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1-7.
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 龙鑫林, 鲁军勇, 魏静波, 等. 锂电池储能在电磁发射中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 66-72.
LONG Xinlin, LU Junyong, WEI Jingbo, et al. Application on lithium batteries for electromagnetic launch [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 66-72. (in Chinese)
- [5] 吴羿廷, 鲁军勇, 龙鑫林, 等. 电磁发射混合储能系统能量传输速率优化[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3715-3720.
WU Yiting, LU Junyong, LONG Xinlin, et al. Optimization of energy transfer rate of hybrid energy storage system in electromagnetic launch [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3715-3720. (in Chinese)
- [6] 赵锡正, 魏晓光, 齐磊, 等. 直流断路器半导体组件关断暂态杂散电感研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5732-5740.
ZHAO Xizheng, WEI Xiaoguang, QI Lei, et al. Research on stray inductance of breaking transient of semiconductor module used for hybrid cascaded DC circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5732-5740. (in Chinese)
- [7] 王帅, 庄劲武, 董润鹏, 等. 基于半经验模型的熔断器燃弧过程计算与分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 319-326.
WANG Shuai, ZHUANG Jinwu, DONG Runpeng, et al. Calculation and analysis of arcing process of fuses based on semiempirical model [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 319-326. (in Chinese)
- [8] 倪尊峰, 赵志斌, 崔翔. 考虑位移电流的部分电感计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5181-5187.
NI Zhouwei, ZHAO Zhibin, CUI Xiang. Computing method partial inductance for conductor segments by considering displacement current [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5181-5187. (in Chinese)
- [9] CHEN C, PEI X, CHEN Y, et al. Investigation, evaluation, and optimization of stray inductance in laminated busbar [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3679-3693.
- [10] DORNELES C A, GUO J, EULL M, et al. Bus bar design for high-power inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2354-2367.
- [11] WANG J, YANG B J, ZHAO J, et al. Development of a compact 750KVA three-phase NPC three-level universal inverter module with specifically designed busbar [C]// Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2010: 1266-1271.
- [12] NI C W, ZHAO Z B, CUI X. Magnetic energy difference between partial inductance method and magnetic field intensity in open-loop problems [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(3): 803-806.
- [13] ZHU H B, HEFNER A R, LAI J S. Characterization of power electronics system interconnect parasitics using time domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(4): 622-628.
- [14] BEDNARZ C, SCHREIBER H, LEONE M. Efficient multiport equivalent circuit for skin and proximity effect in parallel conductors with arbitrary cross sections [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(6): 2053-2056.
- [15] LIU T, WONG T T Y, SHEN Z J. A new characterization technique for extracting parasitic inductances of SiC power MOSFETs in discrete and module packages based on two-port S-parameters measurement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9819-9833.
- [16] 陈材, 裴雪军, 陈宇, 等. 基于开关瞬态过程分析的大容量变换器杂散参数抽取方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 40-47.
CHEN Cai, PEI Xuejun, CHEN Yu, et al. A stray parameter extraction method for high power converters based on turn-on/off transient analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 40-47. (in Chinese)
- [17] 徐国顺, 庄劲武, 杨锋, 等. 大容量蓄电池组的数学建模及参数辨识[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(3): 35-38.
XU Guoshun, ZHUANG Jingwu, YANG Feng, et al. Research on mathematic model and parameter identification of high-capacity storage battery [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(3): 35-38. (in Chinese)
- [18] 冯高辉, 袁立强, 赵争鸣, 等. 基于开关瞬态过程分析的

- 母排杂散电感提取方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6442-6449.
- FENG Gaohui, YUAN Liqiang, ZHAO Zhengming, et al. A novel stray inductance extraction method for bus bars based on turn-on/off transient process[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6442-6449. (in Chinese)
- [19] 金祝锋, 李威辰, 胡斯登, 等. 大容量电力电子装置中母排杂散电感提取方法的优化研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 1-7.
- JIN Zhufeng, LI Weichen, HU Sideng, et al. Optimized stray inductance extraction method of bus bar in large-capacity power electronic equipment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 1-7. (in Chinese)
- [20] 谢宗奎, 柯俊吉, 赵志斌, 等. 碳化硅 MOSFET 换流回路杂散电感提取方法的优化[J]. 电工技术学报, 2018, 33(21): 4919-4927.
- XIE Zongkui, KE Junji, ZHAO Zhibin, et al. Optimized extraction method of stray inductance in commutation path for silicon carbide MOSFET [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 4919-4927. (in Chinese)
- [21] HU X S, LI S B, PENG H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2012, 198(15): 359-367.
- [22] 张振宇, 汪光森, 聂世雄, 等. 脉冲大倍率放电条件下磷酸铁锂电池荷电状态估计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1769-1779.
- ZHANG Zhenyu, WANG Guangsen, NIE Shixiong, et al. State of charge estimation of LiFePO₄ battery under the condition of high rate pulsed discharge [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1769-1779. (in Chinese)
- [23] 卫志农, 原康康, 成乐祥, 等. 基于多新息最小二乘算法的锂电池参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 139-145.
- WEI Zhinong, YUAN Kangkang, CHENG Lexiang, et al. Parameter identification of lithium-ion battery based on multi-innovation least squares algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 139-145. (in Chinese)
- [24] 杨静. 电力系统传输网络与负荷模型辨识及其在电压稳定分析中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 63-69.
- YANG Jing. Power grid and load identification and its application to voltage stability analysis [D]. Changsha: Central South University, 2012: 63-69. (in Chinese)
- [25] YANG J, WU M, HE Y, et al. Identification and application of nonlinear dynamic load models [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2013, 11(2): 173-179.
- [26] MCGRATH B P, HOLMES D G, GALLOWAY J J H. Power converter line synchronization using a discrete Fourier transform(DFT) based on a variable sample rate[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 877-884.
- [27] 刘华吾, 胡海兵, 邢岩. 有限字长对滑动窗 DFT 稳定性的影响研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 22-31.
- LIU Huawu, HU Haibing, XING Yan. Research of finite-word-length effects on the stability of the sliding DFT [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 22-31. (in Chinese)