

采样频率对超级电容特征参数辨识准确度的影响分析

超级电容特征参数是表征其电气性能的重要依据,因此特征参数的辨识准确度对其性能分析结果的准确性非常重要。分别采用电路分析法和系统辨识法两种方法对超级电容特征参数进行辨识,深入分析采样频率的选择对参数辨识准确度的影响。通过实验和仿真结果对比发现相同采样频率下系统辨识方法可获得比电路分析法更准确的结果,而基于系统辨识法采用较低的采样频率可以降低辨识矩阵的变态程度,有利于获得更好的辨识结果。

赵 洋/东莞理工学院电子工程学院

0 引言

储能系统是新能源发电与应用领域中的关键支撑环节,超级电容因其具备可大电流充放电、功率密度高和使用温度范围宽等特点在构建储能系统方面具有广阔的应用前景^[1-6]。在实际应用中,储能系统整体性能表现取决于构成该系统的每节超级电容单体的电气性能,因此对单体性能参数的准确辨识对于评判储能系统具有重要的基础作用^[7-9]。为辨识得到特征参数,需要采集实际工作过程中的充放电电流和端电压数据,然后采用具体的辨识算法进行计算,从而获得最终的辨识结果。

在应用数据采集装置获取超级电容工作过程中原始的充放电数据之前,必须事先确定具体的采样频率。由于采样频率的选择对数据采集系统的硬件要求和计算成本有较大的影响,因此在实际应用中需要根据具体参数辨识的准确度

要求来最终选择一个合适的采样频率。此外,在参数辨识方法方面可以采用电路分析法和系统辨识法等。方法选择不同对于采样频率的要求也不同。本文通过比较不同采样频率和两种特征参数计算方法的特点,并结合实验和仿真分析的结果来为超级电容特征参数辨识中原始数据采样频率的选择提供理论指导。

1 基于电路分析法求解超级电容特征参数的分析

根据车用超级电容器行业测试标准QC/T 741—2014^[10]中的规定,超级电容特征参数(等效电容 C 和等效串联电阻 R)的测试方法。

(1) 等效电容 C 的计算方法

用恒定电流 I_1 对超级电容充电到额定电压,然后以恒定电流 I_1 对超级电容放电到最低电压,记录从额定电压的80%(U_1)至最低电压(U_2)之间的电压范围内超级电容的放电时间 t 。计算公式如下

$$C = I_1 t / (U_1 - U_2) \quad (1)$$

试验中的恒流充放电电流采用1倍率充放电电流,1倍率电流的计算公式为

$$I_1 = C U_{\text{额定}} / 3600 \quad (2)$$

(2) 等效串联电阻 R 的计算方法

该标准中对于等效串联电阻 R 的定义为:超级电容开始恒流充电时起至10 ms后,端电压的变化量与充电电流的比值。等效串联电阻计算如下

$$R = (U_w - U_i) / I_1 \quad (3)$$

式中, U_w 为超级电容开始充电10 ms后的电压; U_i 为超级电容充电时刻前的电压。



赵 洋/副教授

关键词/Keywords

超级电容 ·
特征参数 ·
电路分析 ·
系统辨识 ·
采样频率 ·

国家自然科学基金项目(51407031)。

由以上计算公式可以看出,在计算 C 值时,分母项($U_1 - U_2$)利用的电压范围比较大(即 U_1 和 U_2 的数值相差比较大),不会出现数值病态的现象。因此无论采样频率选择大与小,均不会对 C 值的计算求解造成太大影响。在计算 R 时,其分子项($U_w - U_i$)的分辨率决定了 R 的计算结果。该项是通过计算突加激励后对超级电容端电压的变化来求等效串联电阻。根据该标准的测试要求,可以把激励(充放电电流)看作阶跃信号,如果能捕捉到阶跃信号跳变两端的值则能保证计算结果的准确性,但实际信号采集总是有一定频率限制,因此为了能计算出较为准确的 R 值,总是希望采样频率选择得越低越好。而根据该标准定义的计算式(3)中对 U_w 的定义可知,采用该方法辨识超级电容特征参数的最低采样频率要求为100 Hz。

2 基于系统辨识法求解超级电容特征参数的分析

采用基于系统辨识的方法对超级电容进行特征参数辨识可以把超级电容看作为一个单入单出(Single Input Single Output, SISO)的线性定常系统,如图1所示。其中 $u(k)$ 为输入信号, $x(k)$ 为输出信号^[11]。

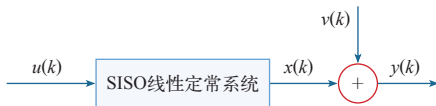


图1 单入单出系统结构图

通过推导系统的连续传递函数,再经 Z 变换得到离散传递函数,最后可获得系统的差分方程。

实际中, $x(k)$ 通过数据采集系统采样而得,由于在采集过程中往往附加有随机干扰噪声 $v(k)$ 。因此,实际测得的结果为 $y(k)$,即

$$y(k) = x(k) + v(k) \quad (4)$$

根据系统的离散传递函数,可推得最终的差分方程的一般表达式为

$$y(k) = -\sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^n b_i u(k-i) + v(k) + \sum_{i=1}^n a_i v(k-i) \quad (5)$$

假设 $v(k)(k=1,2,\dots,n)$ 是均值为零独立同分布

的平稳随机序列,且与输入序列 $u(k)(k=1,2,\dots,n)$ 相互独立。设

$$\xi(k) = v(k) + \sum_{i=1}^n a_i v(k-i) \quad (6)$$

则有

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^n b_i u(k-i) + \xi(k) \quad (7)$$

如果 $u(k)$ 也有测量误差,则在 $\xi(k)$ 中应包含这项测量误差。

测出 $n+N$ 个输入值: $u(1), u(2), \dots, u(n+N)$; $n+N$ 个输出值: $y(1), y(2), \dots, y(n+N)$ 。则可写出 N 个方程,写成矩阵形式后可得到

$$\begin{pmatrix} y(n+1) \\ y(n+2) \\ \vdots \\ y(n+N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y(n) & \cdots & -y(1) & u(n+1) & \cdots & u(1) \\ -y(n+1) & \cdots & -y(2) & u(n+2) & \cdots & u(2) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -y(n+N-1) & \cdots & -y(N) & u(n+N) & \cdots & u(N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \\ b_0 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi(n+1) \\ \xi(n+2) \\ \vdots \\ \xi(n+N) \end{pmatrix} \quad (8)$$

令

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y(n+1) \\ y(n+2) \\ \vdots \\ y(n+N) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} -y(n) & \cdots & -y(1) & u(n+1) & \cdots & u(1) \\ -y(n+1) & \cdots & -y(2) & u(n+2) & \cdots & u(2) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -y(n+N-1) & \cdots & -y(N) & u(n+N) & \cdots & u(N) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \\ b_0 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\xi = \begin{pmatrix} \xi(n+1) \\ \xi(n+2) \\ \vdots \\ \xi(n+N) \end{pmatrix} \quad (12)$$

则有

$$y = \Phi\theta + \xi \quad (13)$$

其中,

$$\Phi = \begin{pmatrix} Y & U \end{pmatrix}_{N \times (2n+1)} \quad (14)$$

$$\theta = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}_{(2n+1) \times 1} \quad (15)$$

进一步可知

$$y_{N \times 1} = \Phi_{N \times (2n+1)} \theta_{(2n+1) \times 1} + \xi_{N \times 1} \quad (16)$$

可以看出, 上式是一个含有 $2n+1$ 个未知参数的 N 个方程组成的联立方程组。根据多项式方程组解的条件。

1) 如果 $N < 2n+1$, 则方程有无穷多解。

2) 如果 $N = 2n+1$, 且矩阵 Φ 的逆矩阵存在, 则方程有确定解 $\theta = \Phi^{-1}y - \Phi^{-1}\xi$ 。

3) 如果 $\xi = 0$, 则可以得到确定的参数向量 $\theta = \Phi^{-1}y$ 。

由于实际应用中测量噪声是不可避免的, 而且 ξ 对参数 θ 的估计值有影响。因此, 为了尽量减少 ξ 对参数 θ 的估计值的影响, 应取 $N > 2n+1$ 。

如果 $N > 2n+1$, 一般情况下方程无解。在这种情况下, 不能用解方程的方法来求 θ , 而要采用数理统计的方法来求 θ 的估计值, 这样可减少 ξ 对参数 θ 估计值的影响。即将解方程组问题转化为给定测量向量 y 和测量矩阵 Φ 求系统参数 θ 估计值的参数辨识问题。

设 $\hat{\theta}$ 为 θ 的最优估计值, $\hat{y}$ 为 y 的最优估计值, 则有

$$\hat{y} = \Phi\hat{\theta} \quad (17)$$

为保证辨识准确度, 即要求估计值和真实值之间的误差最小, 设

$$e = y - \hat{y} = y - \Phi\hat{\theta} \quad (18)$$

进一步, 可设性能指标函数为

$$\begin{aligned} J = e^T e &= (y - \Phi\hat{\theta})^T \cdot (y - \Phi\hat{\theta}) \\ &= y^T y - \hat{\theta}^T \Phi^T y - y^T \Phi \hat{\theta} + \hat{\theta}^T \Phi^T \Phi \hat{\theta} \end{aligned} \quad (19)$$

取极小值, 按 $\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} = 0$ 来求 θ 的最小二乘估计 $\hat{\theta}$,

可得

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} = -2\Phi^T (y - \Phi\hat{\theta}) = 0 \quad (20)$$

求解得到 $\Phi^T \Phi \hat{\theta} = \Phi^T y$, 如果 $\Phi^T \Phi$ 满秩, 则可以得到

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_{LS} = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T y \quad (21)$$

性能指标函数 J 取得极小值的充分条件是

$$\frac{\partial^2 J}{\partial \hat{\theta}^2} = 2\Phi^T \Phi > 0 \quad (22)$$

即要求矩阵 $\Phi^T \Phi$ 正定。

通过上述分析可知, 能否求出待辨识参数, 保证矩阵 $\Phi^T \Phi$ 的正定性是关键。在辨识大时间常数系统的过程中, 系统的响应在相邻的两个采样点之间的变化量太小, 导致被传感器误差以及其他的噪声信息所“淹没”。从而导致在进行数值计算时出现病态矩阵, 参数不能辨识。也即采样频率的选择结果会直接影响到矩阵的正定性。因此选择合适的采样频率是准确获得辨识结果的先决条件。

由于仅从式 (22) 中不能明显地看出采样频率应该如何选择, 因此在实际应用中要根据经验公式和具体研究对象的特性来选择恰当的采样频率。

3 相同采样频率下两种辨识方法比较分析

由于车用超级电容测试标准要求计算超级电容的特征参数时只能以恒流信号作为激励信号, 因此本文所述实验均以恒流信号进行比较分析。从这点也可以看出, 由于超级电容在实际工作中其工作电流并不能保证总是恒流状态, 因此基于传统电路分析法计算超级电容参数在实际系统中的应用会受到限制, 而采用系统辨识方法只需满足辨识矩阵的正定性就可以辨识, 而实际系统工作时的信号通常总能满足这一要求, 所以基于系统辨识法求解超级电容特征参数具有更广的适用性。

以测试标准要求的1倍率充电实验为例, 采样频率选择能满足标准最低要求的100 Hz。实验用超

级电容的标称参数为等效串联内阻0.5 mΩ，等效电容80 000 F。实时采集的实验数据如图2所示。

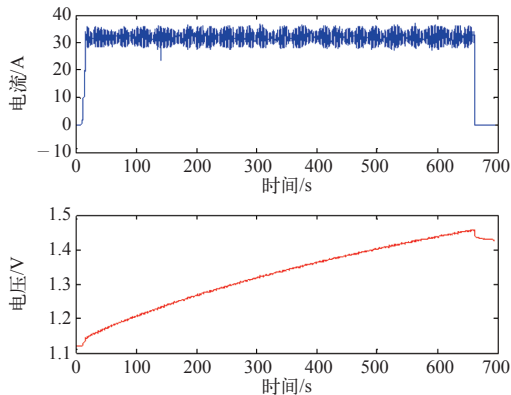


图2 恒流充电实验波形

分别采用电路分析法和系统辨识法计算得到超级电容的特征参数如表1所示。

表1 特征参数辨识结果

参数名称	参数值	
	电路分析法	系统辨识法
等效串联内阻 <i>R</i> /Ω	0.000 517	0.000 452
等效电容 <i>C</i> /F	68 839	643 44

将两种辨识方法得到的结果代入在Matlab/Simulink环境下建立的超级电容等效电路模型进行仿真，得到的仿真曲线分别如图3和图4所示。

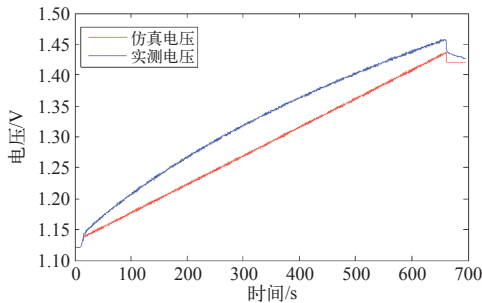


图3 电路分析法仿真端电压曲线与实测端电压曲线对比

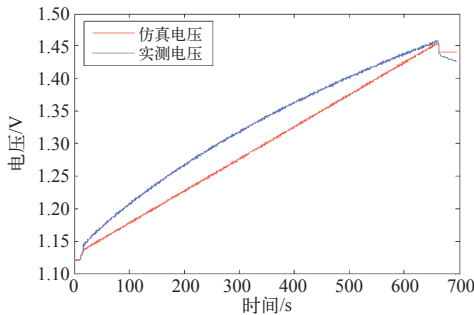


图4 系统辨识法仿真端电压曲线与实测端电压曲线对比

计算两种方法的仿真准确度并进行分析，具体结果如表2所示。

表2 仿真准确度结果对比

计算方法	平均绝对误差	平均相对误差	最大绝对误差	最大相对误差
	/mV	(%)	/mV	(%)
电路分析	5	0.44	50	3.7
系统辨识	4	0.35	42	3.2

从表2所示的结果可以看出，基于相同的实验数据和采样频率，采用系统辨识方法得到的辨识准确度要高于电路分析法。

4 不同采样频率辨识效果对比分析

基于系统辨识法，可以根据经验公式^[12]初步确定采样频率的选择范围，该公式给出系统主要时间常数和采样周期的关系为

$$T_0 = (0.005 \times 0.1) T_a \tag{23}$$

针对本文的实验对象，可计算出其时间常数 $T_a = RC = 0.000\ 5 \times 80\ 000\ \text{s} = 40\ \text{s}$ ，根据式(23)可以得到 $T_0 = (0.2 \sim 4)\ \text{s}$ ，最终确定选取1 Hz作为实验数据的采样频率。

为验证该采用频率是否能满足准确度要求，以下实验分析采用同一组原始数据而应用不同的采样频率(100 Hz、1 Hz和0.25 Hz)进行辨识。具体方法是对原始实验数据采用1 kHz进行采样，然后对采样得到的数据再利用较低的三种采样频率进行分频得到相应采样频率下的实验数据，以此来保证实验过程为同一过程。

不同采样频率下辨识得到的参数的对比结果如表3所示。

表3 特征参数辨识结果

参数名称	参数值		
	100 Hz	1 Hz	0.25 Hz
等效串联内阻 <i>R</i> /Ω	0.000 452	0.000 523	0.000 649
等效电容 <i>C</i> /F	64 344	64 858	65 221

与上文所述仿真实验方法相同，选取本例中的100 Hz和0.25 Hz的参数辨识结果代入Matlab/Simulink所搭建的模型中进行仿真分析，仿真准确度的对比结果如表4所示。

表4 仿真准确度结果对比

采样频率	平均绝对误差	平均相对误差	最大绝对误差	最大相对误差
/Hz	/mV	(%)	/mV	(%)
100	4	0.35	42	3.2
0.25	3	0.26	38	3

可以看出,采用系统辨识方法求解超级电容特征参数时,选择较高采样频率获得的辨识结果的准确度低于选用较低采样频率所得到的结果。因此应用系统辨识方法求解超级电容特征参数时,采样频率的选择并非越高越好。为进一步分析说明采样频率对辨识结果的影响,分别计算不同采样频率下矩阵 $\Phi^T\Phi$ 的条件数,以此来判断矩阵的病态程度。具体计算结果如表5所示。

表5 矩阵条件数计算结果对比

采样频率/Hz	矩阵条件数
100	1.460 2e+005
1	1.524 0e+003
0.25	410.484 5

根据表5的结果可以看出,采样频率选择的越高,矩阵 $\Phi^T\Phi$ 的条件数越大,即矩阵的病态程度越高,因而不利于得到好的辨识结果。因此在采用系统辨识法求解超级电容特征参数时必须合理选择采样频率才能保证得到正确的结果。

5 结束语

本文针对采样频率对超级电容特征参数辨识准确度的影响进行深入分析。通过对比电路分析和系统辨识等两种超级电容特征参数辨识方法的差异性可知,前者在计算过程中对激励信号有特殊要求(恒流信号),而且计算等效串联电阻时要求有较高的时间分辨率,这在实际应用中提高了对系统硬件的要求。而后者在不同采样频率下均可得到比传统方法更准确的解,但是采样频率的选择如果不恰当有可能造成辨识结果的不稳定,因此必须根据先验知识和实际对象的特性来确定一个合适的采样频率。基于本文的实验和仿真结果可以得到以下结论。

1) 系统辨识法相对于电路分析法对激励信号形态的要求比较宽松,因而具有更好的适用性和

准确性。

2) 选择较低的采样频率可有效降低系统辨识方法中辨识矩阵的病态程度,有利于获得更准确的结果。这对于系统的硬件要求将大大降低,在实际应用中具有更好的应用价值。

此外,在实际应用中,为保证参数辨识准确度,还要求信号采集电路必须满足超级电容的电压和电流信号同步采集的需求。针对具体硬件电路的设计和实现将是笔者后续重点研究的内容。

参考文献

- [1] Luo X, Wang J, Dooner M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation [J]. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.
- [2] Ren Guizhou, Ma Guoqing, Cong Ning. Review of electrical energy storage system for vehicular applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 225-236.
- [3] Meller M, Menzel J, Fic K, et al. Electrochemical capacitors as attractive power sources [J]. Solid State Ionics, 2014, 265: 61-67.
- [4] 赵亮, 刘炜, 李群湛. 城市轨道交通超级电容储能系统的EMR建模与仿真 [J]. 电源技术, 2016, 40(1): 124-127, 165.
- [5] Sharma P, Bhatti T S. A review on electrochemical double-layer capacitors [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2901-2912.
- [6] 赵洋, 姜鸣, 刘学良. 超级电容器等效电路模型参数辨识算法比较研究 [J]. 电气应用, 2015, 34(15): 80-84.
- [7] 赵洋, 韦莉, 张逸成, 等. 基于粒子群优化的超级电容器模型结构与参数辨识 [J]. 中国电机工程学报, 2012(15): 155-161.
- [8] 孙家南, 赵洋, 韦莉, 等. 基于系统辨识的电化学超级电容器建模 [J]. 高压电器, 2012, 48(9): 16-21, 26.

(下转第35页)

在进行接地网接地阻抗测试时, 电流注入点沿接地网对角线变化时, 接地阻抗模值先减小再增大, 在对角线中点有极小值, 可以推断当故障点发生在接地网中心时, 接地网的散流效果最好。在边角处的接地阻抗值较大, 所以在进行接地网接地阻抗现场测量时, 需在边角上接地散流效果最差的点为电流注入点, 以此时测得的接地阻抗值作为基准, 评价最为严格。

4 结束语

本文依据接地网计算理论, 利用CDEGS接地网特性仿真计算软件对甘肃某变电站接地网建立计算模型, 计算了接地网在不同电流注入点时地表电位、接触电压、跨步电压分布和接地阻抗, 不同电流注入点对上述参数影响的相关计算结论, 为今后变电站接地网的现场测试与准确评估提供了相关依据。

参考文献

- [1] 胡春江, 河西走廊高土壤电阻率地区电网接地电阻测量与分析 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (18): 121-123.
- [2] DL/T 475—2006 接地装置特性参数测量导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 李增. 复杂土壤地区接地网电气特性的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [4] 李谦, 肖磊石, 饶章权, 等. 广东电网变电站接地网安全性状态评估 [J]. 南方电网技术, 2013, 7 (5): 21-26.
- [5] 司文荣, 傅晨钊, 卞晓亮, 等. 变电站接地网缺陷诊断无误评价方法综述 [J]. 电气工程学报,

2015, 10 (8): 14-21.

- [6] 鲁志伟, 常树生, 李越, 等. 大型变电所接地网接地阻抗与接地电阻的差异 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (1): 14-16.
- [7] 李谦. 发电厂和变电站接地网安全状态评估 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [8] 王洪泽, 杨丹, 王梦云. 电力系统接地技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] 曾嵘, 何金良, 高延庆, 等. 电极位置对垂直三层土壤结构中接地系统接地电阻测量结果的影响 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001.
- [10] Rogers E J, White J F. Mutual coupling between finite lengths of parallel or angled horizontal earth return conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (1): 103-113.
- [11] 郭华俊, 董巧元, 姚晓芳, 等. 大型接地装置接地电阻测量及其影响因素 [J]. 高电压技术, 2002, 28 (12): 47-48.
- [12] Zeng Rong, Gong Xuehai, He Jinliang, et al. Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (2): 667-675.
- [13] 孙结中, 刘力. 运用等值复数镜像法求解复合分层土壤结构的格林函数 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (9): 146-151.
- [14] Guemes-Alonso J A, Hernando-Fernandez F E, Rodriguez-Bo-na F, et al. A practical approach for determining the ground resistance of grounding grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (3): 1261-1266.

(收稿日期: 2016-05-17) **EA**

(上接第30页)

- [9] 李洪珠, 孙佳月, 马文涛, 等. 基于半桥变换器与次序耦合变压器超级电容均压 [J]. 电气工程学报, 2015, 10 (6): 41-46.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. QC/T 741—2014 车用超级电容器 [S]. 北京: 中国计划出版

社, 2006.

- [11] 方崇智, 萧德云. 过程辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [12] 王志贤. 最优状态估计与系统辨识 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.

(收稿日期: 2016-04-11) **EA**