

7-2-2020

Integrated Dynamic Equivalent Model of Super Capacitor Energy Storage System

Xinran Li

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

Tingting Xu

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

Shaojie Tan

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

Xingting Cheng

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Integrated Dynamic Equivalent Model of Super Capacitor Energy Storage System

Abstract

Abstract: As a high-power energy storage device, super capacitor (SC) is applied in micro-grid energy storage, secondary frequency regulation and peak load shifting in power system, and the research of which has become a hotspot. *A second-order model of SC monomer suitable for the grid simulation was established, and the parameter identification using the charge and discharge experiment data under constant current and constant power modes was conducted based on genetic algorithm. A SC energy storage system has been set up in Simulink/Matlab based on the established second-order model of SC. The integrated dynamic equivalent model of SC energy storage system was established by steady-state and transient analysis of the 4-node grid simulation system containing SC, and parameters identification was conducted with genetic algorithm. The integrated dynamic equivalent model has been proven to have good description ability, parameter stability and applicability by co-simulation.*

Keywords

super capacitor energy storage system, monomer modeling, parameter identification, load dynamic modeling, genetic algorithm

Authors

Xinran Li, Tingting Xu, Shaojie Tan, Xingting Cheng, and Xiaojun Zeng

Recommended Citation

Li Xinran, Xu Tingting, Tan Shaojie, Cheng Xingting, Zeng Xiaojun. Integrated Dynamic Equivalent Model of Super Capacitor Energy Storage System[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 783-792.

超级电容储能系统动态综合等效模型

李欣然, 徐婷婷, 谭绍杰, 程兴婷, 曾小军

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 超级电容(Super Capacitor, SC)作为一种高功率型储能设备, 其在电力系统中参与微网储能、电网二次调频、削峰填谷是当下研究的热点。构建了适用于并网仿真的超级电容二阶单体模型, 并采用超级电容实物在恒电流和恒功率 2 种模式下的充放电数据, 基于遗传算法对模型进行了参数辨识。采用所建立的超级电容并网二阶模型, 在 Simulink/Matlab 仿真平台中构建了超级电容储能系统。将超级电容储能系统接入 4 节点电网仿真系统, 通过对电网仿真系统进行稳态和暂态分析, 提出了超级电容储能系统的动态综合等效模型, 并采用遗传算法进行了参数辨识。通过联合仿真, 结果表明动态综合等效模型具有良好的描述能力、参数稳定性和适用性。

关键词: 超级电容储能系统; 单体建模; 参数辨识; 负荷动态建模; 遗传算法

中图分类号: TM911.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 04-0783-11

Integrated Dynamic Equivalent Model of Super Capacitor Energy Storage System

Li Xinran, Xu Tingting, Tan Shaojie, Cheng Xingting, Zeng Xiaojun

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: As a high-power energy storage device, super capacitor (SC) is applied in micro-grid energy storage, secondary frequency regulation and peak load shifting in power system, and the research of which has become a hotspot. A second-order model of SC monomer suitable for the grid simulation was established, and the parameter identification using the charge and discharge experiment data under constant current and constant power modes was conducted based on genetic algorithm. A SC energy storage system has been set up in Simulink/Matlab based on the established second-order model of SC. The integrated dynamic equivalent model of SC energy storage system was established by steady-state and transient analysis of the 4-node grid simulation system containing SC, and parameters identification was conducted with genetic algorithm. The integrated dynamic equivalent model has been proven to have good description ability, parameter stability and applicability by co-simulation.

Keywords: super capacitor energy storage system; monomer modeling; parameter identification; load dynamic modeling; genetic algorithm

引言

近年来, 太阳能、风能等新能源发电技术的装

机容量日益增加, 而新能源发电的不可预测性和不可调度性将严重威胁电网的安全运行和电能质量。超级电容是一种能够快速响应能量波动的大功率型储能装置。电网通过超级电容储能系统的接入, 能够增加其备用调节容量, 同时为分布式电源的平滑接入提供保障^[1]。但随着大容量储能装置投入的日益增多, 改变了常规配网的拓扑结构和负荷构成, 给电网的分析与控制带来了新的挑战, 其中包



收稿日期: 2014-11-07 修回日期: 2014-12-25;
基金项目: 国家 973 重点基础研究计划 (2012CB215101); 国家自然科学基金(51477043);
作者简介: 李欣然(1957-), 男, 湖南涟源, 博士, 教授, 博导, 研究方向电力系统负荷建模; 徐婷婷(1990-), 女, 重庆潼南, 硕士生, 研究方向为超级电容储能系统建模应用等。

<http://www.china-simulation.com>

• 783 •

括了超级电容储能系统对配电网综合负荷建模的影响^[2]。要解决这一问题,需要建立超级电容适合于电网仿真的单体等效电路模型,再进行含有超级电容的配网负荷建模。

超级电容是一种可循环充放电的电化学储能装置,但充放电过程中电解质损耗低,这决定了超级电容器较长的使用寿命^[3]。与常规电容器相比,超级电容具有更快的充电速度,以 16.5 F 超级电容储能系统为例,初始端电压 200 V,以 30 A 电流充电到额定电压 450 V 只需要 140 s。由于循环储能损耗低,超级电容能量转换效率高。此外单位质量的超级电容存储的功率高;可完全放电,而并不影响其整体性能;它还同时兼具环境友好性、较高安全性能、维护简单的特点,适用于恶劣天气和低温环境。

目前中西方学者根据超级电容工作特性对其单体物理建模问题进行了一系列探索:1) Helmholtz 基于超级电容工作机理及其内部结构,提出了超级电容器的经典理论模型;2) 从超级电容电极的结构特点和工作原理出发,提出了其等效传输线模型^[4];3) 根据实际工程与仿真分析需求,搭建的德拜模型、经典阻容(Resistance-Capacitance, RC)等效模型、多分支 RC 模型、三阶 RC 模型、改进三阶 RC 模型^[5];也有学者建立了超级电容的热模型、频域模型、智能模型^[6-7]。以上建模研究,一些注重于超级电容内部工作机理特性,一些注重于超级电容在复杂应用中的简单等效;第一类模型,由于考虑了过多影响超级电容特性的因素,而过于复杂,在接入配网进行仿真计算时运算量大,不利于系统稳定;第二类模型,一般采用电容与电阻的串联,模型简单,但是不能反映超级电容通过功率转换系统接入电网这一系统的整体动态特性。目前为止,缺少超级电容适合于电网仿真并且能够准确描述其自身工作特性的单体模型,而含有超级电容储能系统的负荷建模方面,相关研究工作还比较匮乏。

本文基于双电层型超级电容,从实用性出发采用综合改进的遗传算法,提出能较准确模拟超级电

容工作特性及适用于电网仿真的单体模型;再将超级电容接入电网多节点仿真系统,其中功率转换系统利用恒功率控制(PQ control, PQ)策略,进行含有超级电容储能系统的动态负荷建模,即通过对仿真系统的暂态仿真提出超级电容储能系统的动态综合等效模型(机电暂态模型)。

本文主要工作包括以下 5 方面:1) 提出了超级电容的并网二阶模型;2) 利用综合改进的遗传算法,根据 2 种不同类型实验数据进行了参数辨识及优化,3) 基于 Simulink/Matlab 仿真平台,搭建了超级电容储能系统并网仿真模型,其中功率转换系统采用 PQ 控制;4) 通过对超级电容储能系统并网仿真模型进行稳态分析和暂态分析,提出了超级电容储能系统的动态综合等效模型;5) 基于 Matlab 和 PSASP,通过暂态仿真和遗传算法辨识建模对提出的等效模型进行了描述能力、参数稳定性、适用性检验。

1 超级电容器单体模型

1.1 超级电容工作原理

超级电容器是容量达到法拉级的一种大容量电化学电容,也叫做“电容电池”,根据工作原理可分为法拉第准电容和双电层电容,法拉第准电容的工作机理与电池反应相似,在电容电极面积大小相同的情况下,它的电容量是双电层电容的 10~100 倍^[8];但双电层超级电容器兼具蓄电池能量密度大和电解电容器功率密度大的优点,其性能较法拉第准电容更好,本文研究的超级电容器主要是碳极双电层原理的电化学电容器,简称为超级电容器。

超级电容内部结构及工作原理如图 1,超级电容器在充放电过程中依靠电解质中自由离子的移动产生等效电流,充放电过程在宏观上是可逆的,因此其使用寿命比普通储能电池更长。同时活性炭电极的多孔结构决定了在理论上不能用普通电容器来描述超级电容器的特性。

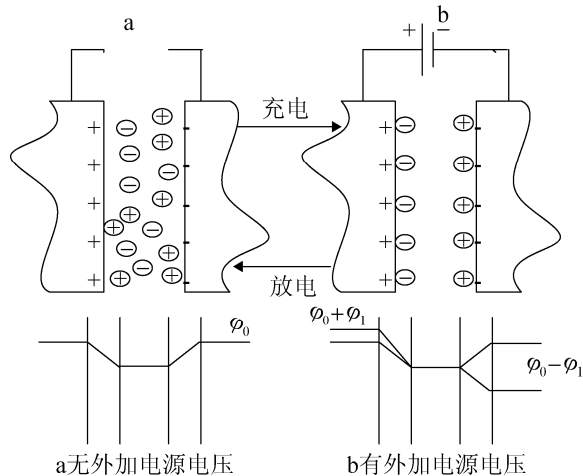


图 1 超级电容原理图

1.2 超级电容并网二阶模型

超级电容器单体在充放电过程中表现出的特点^[9]主要为: 1) 恒电流充放电开始瞬间, 端电压出现小幅度陡升陡降, 之后端电压程非线性稳定上升; 2) 充放电完成后的一段时间, 超级电容端电压逐步趋于稳定, 即充电完成后, 超级电容端电压出现一定程度的下降, 放电完成后, 端电压出现一定程度的上升, 这一过程相对于充放电过程时间常数较大。现象 1) 可以用串联电阻来等效, 这一电阻可以称为超级电容等效内阻; 现象 2) 表明不能用单一的 RC 串联支路对超级电容进行等效, 必须用不同时间常数的 RC 串联支路串并联来解释现象 2) 中出现的电压自调整过程。

超级电容并网二阶模型如图 2 所示, 该模型由 3 条支路构成, R_1 、 C_1 串联支路时间常数较小, 模拟超级电容的即时充放电效应, R_2 、 C_2 串联支路时间常数较大, 模拟充放电过程中以及充放电结束后的电压调整现象, R_L 是一个大电阻, 模拟超级电容器长时间静止的自放电现象, 可以称为漏电阻。

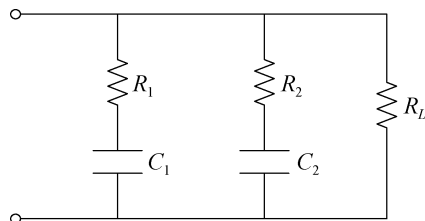


图 2 超级电容并网二阶模型

基于 Simulink/Matlab 软件平台搭建容量为 350 F 的超级电容并网二阶模型, 并对其进行 100 A 恒流充放电仿真实验。所得端电压随时间变化曲线与之前学者所建三阶 RC 模型^[10]和改进二阶 RC 模型^[11]的仿真曲线对比如图 3 所示。

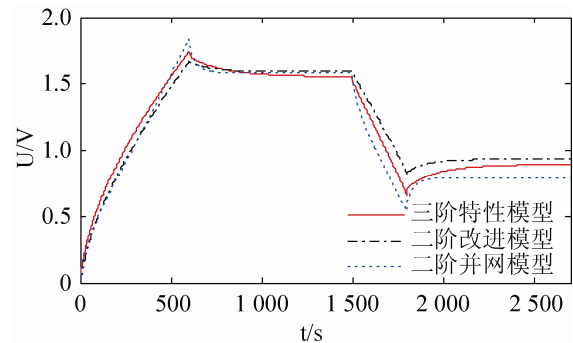


图 3 三阶特性模型、改进二阶模型、并网二阶模型仿真曲线对比

仿真实验方案为: 0~600 s 采用 100 A 恒定电流对超级电容进行充电; 600~1 500 s 静置; 1 500~1 800 s 采用 100 A 恒定电流对超级电容进行放电; 1 800 s 以后超级电容静置。从仿真曲线可以看出, 3 种模型均能较好的表现超级电容的充放电特性。3 条仿真曲线误差存在的原因在于, 3 种模型对超级电容的描述侧重点不同, 本文的二阶并网模型侧重于参与电网仿真, 因为超级电容使用寿命长, 损耗小, 所以忽略了单次充放电过程中端电压对超级电容容量的影响, 而其他 2 个模型注重于超级电容单体特性, 考虑了每次充放电过程中电容端电压对电容容量的影响。

1.3 超级电容二阶模型参数辨识

以上分析表明, 根据超级电容并网二阶模型的特性, 需要求得参数为 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 、 R_L , 5 个参数不同的取值, 将能表现不同容量的超级电容运行特性, 根据辨识建模的分析, 其中 R_L 的取值对超级电容模型的影响不敏感, 人为设定为 200 k Ω , 下面将分别采用超级电容的恒电流、恒功率充放电实验数据, 对剩余模型参数进行辨识。

1.3.1 超级电容单体等效数学模型

根据图 2 建立的超级电容等效电路,以超级电容的充电电流和端电压分别作为激励 i 和响应 u_c , 状态向量 x 为两条 RC 支路中的电容电压 u_{c1} , u_{c2} , 即令 $x=[u_{c1} \ u_{c2}]^T$; 模型参数向量 $\alpha=[R_1 \ C_1 \ R_2 \ C_2 \ R_L]^T$; 输出(响应)向量 $y=u_c$ 。即超级电容单体数学模型可由式(1)表示:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, \alpha, i) \\ y = h(x, \alpha, i) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中包含了超级电容的状态方程和超级电容的输出方程。根据等效电路模型,可得状态方程的具体形式为式(2):

$$\begin{cases} \frac{du_{c1}}{dt} = \frac{u_c}{R_1 C_1} - \frac{u_{c1}}{R_1 C_1} \\ \frac{du_{c2}}{dt} = \frac{u_c}{R_2 C_2} - \frac{u_{c2}}{R_2 C_2} \end{cases} \quad (2)$$

化简式(2)可得式(3), 在给定模型激励电流 I , 并确定初始条件 $u_{c1}(0)$, $u_{c2}(0)$ 后, 求解式(3)可得 u_{c1} , u_{c2} , 进而可求出超级电容的端电压响应, 如式(4):

$$\begin{cases} \frac{du_{c1}}{dt} = -\frac{(R_2 + R_L)u_{c1}}{C_1(R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L)} + \frac{R_L u_{c2}}{C_1(R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L)} + \frac{i R_2 R_L}{C_1(R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L)} \\ \frac{du_{c2}}{dt} = \frac{R_L u_{c1}}{C_2(R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L)} - \frac{(R_1 + R_L)u_{c2}}{C_2(R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L)} + \frac{i R_1 R_L}{C_2(R_1 R_2 + R_1 R_L + R_2 R_L)} \end{cases} \quad (3)$$

$$u_c = R_L \left(i - C_1 \frac{du_{c1}}{dt} - C_2 \frac{du_{c2}}{dt} \right) \quad (4)$$

式(3)和(4)一起构成了超级电容并网二阶等效电路模型的数学模型。

1.3.2 基于遗传算法的实测数据参数辨识

采用 450 V/16.5 F 超级电容储能系统(实验室购买装置), 对其进行不同电流(10 A~50 A)的充放

电实验, 并测得超级电容充放电过程中的电压、电流随时间变化的曲线。

从得到的实验数据可得出充电电流越大, 超级电容达到额定电压的时间越短, 放电时间也随着放电电流的增大而变短, 实物系统由于设置了内部保护程序, 所以始终保持超级电容的端电压不低于 200 V。

采用在 30 A 充电电流下, 得到的超级电容激励和响应数据, 即电流 I - t 、电压 U - t , 根据综合改进的遗传算法^[12]对单体模型参数进行辨识, 端电压拟合情况如图 4, 图中实线为试验曲线, 虚线为模型响应曲线, 实线为锯齿状, 其产生误差的原因在于, 实验室中给超级电容装置充电的电流是交流电经逆变器和双向 DC/DC 后的直流, 由于过多电力电子器件, 而又没有加入滤波装置的原因, 产生了较多的谐波, 所以导致了试验曲线的较大波动, 这一部分波动不在辨识范围内。所以从辨识曲线可以看出, 在误差允许范围内, 并网二阶模型能够较好的表现实际超级电容储能组的运行特性。

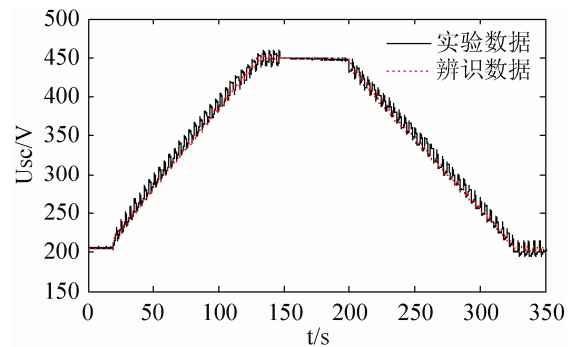


图 4 30A 充放电辨识曲线

采用相对误差 J 检验模型拟合效果, 其值可以按式(5)计算。

$$J = \sqrt{\sum_{k=0}^N (u_m^*(k) - u^*(k))^2 / N} \quad (5)$$

式中: $u_m(k)$ 为模型计算所得端电压值; $u(k)$ 为实测系统端电压值; k 为具体采样点; N 为数据采样点数。

由此辨识误差由式(5)计算得: $J=0.013\%$ 。

得到的参数值如表 1。

表 1 恒电流下的参数表

参数	数值
R_1	$3.96 \text{ e-}2 \Omega$
C_1	$1.40 \text{ e} 5 \text{ F}$
R_2	$3.29 \text{ e-}1 \Omega$
C_2	$1.19 \text{ e} 4 \text{ F}$
R_L	$2.00 \text{ e} 5 \Omega$

采用 480V/33 F 超级电容实物(某实验基地装置), 对超级电容组分别进行 1 kW~20 kW(1 kW, 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW)之间的不同功率充放电, 超级电容初始电压为 240 V, 对其充电到 420 V, 再放电到 240 V 为一个循环, 充电结束时, 静置 5min, 使端电压趋于稳定再进行放电。采样周期为 1 s, 测量储能设备端电压变化情况, 记录端电压、端电流数据。本文选取充放电功率为 10 kW, 15 kW, 20 kW 下的实验数据对模型参数进行辨识。辨识结果如图 5(选取 20 kW 辨识结果)。

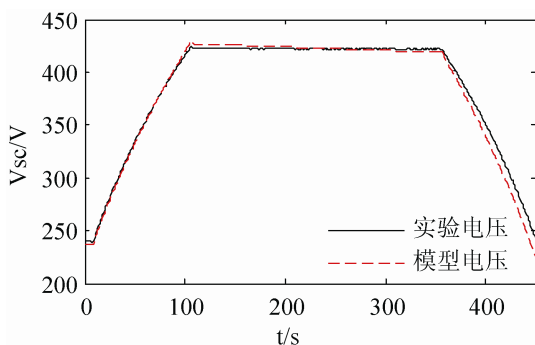


图 5 20 kW 恒功率充放电数据辨识结果

图 5 表明, 在误差允许范围内, 超级电容并网二阶模型能够较好的表现实际超级电容储能组的运行特性。将 10 kW, 15 kW, 20 kW 3 组实验数据的辨识所得参数进行平均, 得到参数如表 2。

表 2 恒功率下的参数表

参数	数值
R_1	$3.96 \text{ e-}2 \Omega$
C_1	$2.85 \text{ e} 5 \text{ F}$
R_2	$3.29 \text{ e-}1 \Omega$
C_2	$2.40 \text{ e} 4 \text{ F}$
R_L	$2.00 \text{ e} 5 \Omega$

在表 2 所示参数下, 各组数据辨识的误差情况如表 3。

表 3 恒功率辨识误差

编号	功率/kW	误差%
1	10	0.013
2	15	0.012
3	20	0.014

1.3.3 辨识结果的分析与讨论

在模型参数稳定性方面, 首先, 恒电流充放电模式下, 5 组实验数据在同一组参数下取得的各组实验数据的拟合结果误差均远小于 1%, (上文只列出 30 A 充放电数据辨识情况), 其次, 在恒功率充放电模式下取得的各组实验数据的辨识结果(表 3)表明了模型参数具有良好的稳定性。

由此可见, 搭建的超级电容并网二阶模型, 在恒电流、恒功率 2 种工作模式下, 均能较好模拟超级电容的充放电特性, 且均有较好参数稳定性。同时, 由于恒功率实验装置的容量为 33 F, 恒电流实验装置的容量为 16.5 F, 为 2 倍关系。通过对并网二阶模型的参数灵敏度分析可以发现, 并网二阶模型中 R_1 , C_1 , R_2 , C_2 对模型特性的影响特点是: 随着 R_1 取值的不断增大, 端电压有所增加, 充电开始时端电压变化率高达 39%, 随后变化率逐渐减小, 充电结束时变化率为 1%, 由此可以看出电阻 R_1 对超级电容充放电瞬间的影响比较大, 即影响充放电瞬间电压的突变, 由此可得 $R_1 = \Delta V / I$ (电压瞬间突变值/充电电流); R_2 主要影响超级电容充放电结束后电压的再分配; 参数 C_1 主要影响超级电容的充电速度及容量, 充电速度随着 C_1 的增大而减小, 充电速度与 C_1 的大小成反比, 超级电容最大容量随 C_1 的增大而增大, 容量与 C_1 的取值成正比; C_2 在一定程度上影响超级电容的容量和充电速度, C_2 的取值与充电速度成正比, 与容量成正比关系。可以近似考虑, 模型中 2 条 RC 支路的参数 C_1 , C_2 与容量成比例关系, 而从表 1, 表 2 的参数可以看到, 2 条 RC 支路的时间常数关系近似为 2 倍关系, 与容量比相等, 证明了推理的正确性。

根据以上分析, 可见在误差(5%)范围允许内, 超级电容并网二阶模型能较好地模拟超级电容在

恒电流、恒功率 2 种充放电模式下的充放电特性，且模型简单，参数易于辨识，并网稳定性强，证明了并网二阶模型的有效性及其实用性。下面将基于超级电容并网二阶等效电路模型，建立超级电容储能系统的负荷动态模型。

2 超级电容并网控制策略

在 Simulink/Matlab 软件平台中搭建超级电容二阶模型的并网模型。超级电容并网结构如图 6 所示。

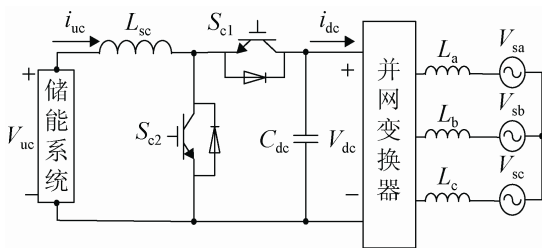


图 6 超级电容并网结构图

超级电容组通过非隔离型半桥双向 DC/DC 变流器和并网逆变器与电网相连，双向 DC/DC 变流器采用电流内环电压外环的控制方式，并网逆变器采用外环 PQ 控制、内环电流控制的双闭环控制。当超级电容器进行充电时，控制信号让并网逆变器工作于整流状态，同时让双向 DC/DC 变流器工作于 BUCK 电路模式。当超级电容器进行放电时，控制信号让并网逆变器工作于逆变状态，同时让双向 DC/DC 变流器工作于 BOOST 电路模式^[13]。

以实验室购置的 30 kW 超级电容为例，通过并网，可以进行充放电实验：电网通过功率转换系统(Power Conversion System, PCS)与超级电容器建立通路，实现超级电容器的充放电。储能调频实验：动态模拟实验室机组和负载构成的简单电网在增加负载过程中，会造成电网频率的偏移，超级电容储能系统容量为 30 kW，在容量保护机制内，可以通过短暂的出力，提高电网频率，减小电网频率偏移量，在这里，超级电容储能系统的作用相当于二次调频。微网实验：超级电容连接无穷大电源，电源向负载供电，同时给超级电容充电；当无穷大电

源断开时，由超级电容向负载供电。超级电容的作用类似于(uninterruptible power supply, UPS)不间断电源。

以上并网应用可以看出，功率转换系统作为连接储能元件和交流电网的关键性纽带，不管是在实际应用，还是在电力系统仿真中，都起着重要的作用^[14]。尤其是在电力系统仿真方面，对仿真时间、仿真结果的影响都很大，由于电磁暂态仿真与机电暂态仿真相比，使用的模型更为复杂，计算速度较慢，而机电暂态模型忽略了许多储能系统的内部电磁特性，而以外部特性的动态方程为主，可在很大程度上提高分析速度，从而能大大简化模型，提高运算速度。因此，建立储能+PCS 系统的机电暂态模型对储能系统的仿真有着重大的意义。机电暂态模型，本文也叫做动态综合等效模型。

为建立超级电容动态综合等效模型，根据超级电容并网控制策略，将超级电容+PCS 的储能系统接入传统 4 节点电网仿真系统，如图 7 所示。

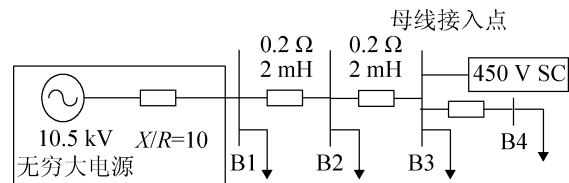


图 7 4 节点仿真系统结构图

3 超级电容储能系统等效描述

3.1 超级电容储能系统的动态特性

通过对 4 节点电网仿真系统的仿真表明，超级电容储能系统在稳态运行情况下，PCS 通过 PQ 控制策略向电网输送或者吸收恒定功率，要完成超级电容储能系统的负荷建模，必须进行动态仿真，研究超级电容储能系统接入电网的动态特性。在给定扰动的暂态情况下，超级电容储能系统是否还能跟踪电网恒功率需求是研究储能系统动态特性的基础。下文根据超级电容储能系统并网机理，研究超级电容储能系统在电网电压跌落暂态过程中所表现出的负荷动态特性，将超级电容+PCS 系统看做

一个整体, 忽略系统内部电力电子器件的复杂特性, 提出能准确描述其储能系统外特性的动态综合等效模型。

基于上述 4 节点仿真系统, 在超级电容储能系统并网过程中, 通过在母线接入点设置电压跌落故障, 使超级电容储能系统接入点的母线电压在 0.5~0.7 s 间跌落 10%~60% 不等, 得到超级电容储能系统母线入网点的动态负荷特性, 即该点的有功功率、无功功率及母线电压数据。以电压跌落 20% 为例, 超级电容储能系统入网点电压 U 及输出有功、无功功率 P , Q 的动态特性曲线如图 8 所示。

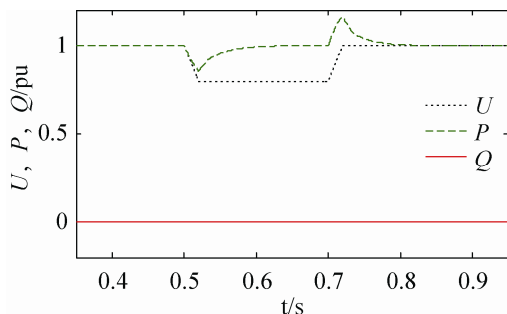


图 8 超级电容储能系统并网后网侧 P , Q , U

根据图 8 可见, 超级电容储能系统的动态负荷特性为: 在母线电压跌落的暂态过程中, 超级电容储能系统输出的有功功率变化幅度高达 20%; 输出的无功功率变化较小。同时超级电容储能系统的有功和无功输出在母线电压恢复后, 经过短暂波动逐步恢复到稳态值。所以, 在进行超级电容储能系统的配网综合负荷建模时, 考虑到其动态特性, 必须用广义的动态负荷进行等效, 而不能将超级电容储能系统当做静态恒功率负荷^[15]。

3.2 超级电容储能系统动态综合等效模型

根据超级电容储能系统的负荷动态特性, 可以发现超级电容储能系统在母线接入点电压跌落后的暂态过程中, 母线接入点的电流变化规律与电感充放电时电流的变化规律相似, 又由于超级电容储能系统具有电压源性质, 所以构建如图 9 所示的等效电路表示的超级电容储能系统的单相等效电路^[16]。

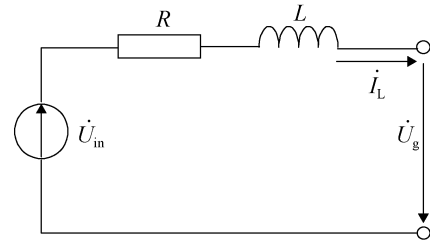


图 9 超级电容储能系统等效电路

图 9 中, U_{in} 为逆变器网侧电压; I_L 为超级电容储能系统由母线接入点注入电网的电流; R 为电路中等效电阻; L 为电路中等效电感; U_g 为母线接入点的上网电压。

由于电网暂态过程的时间常数为 ms 级, 而超级电容储能系统放电的时间常数一般可达到秒级, 所以在电力系统暂态过程中 U_{in} 可以看做储能系统在常规运行条件下的一个电压常数^[17]。

根据储能系统等效电路的电气关系, 可以得到超级电容储能系统的 d 轴、q 轴动态方程为:

$$\begin{cases} \frac{dI_{L,d}}{dt} = \frac{1}{L}(U_{in,d} - U_{g,d} - I_{L,d}R) - \omega I_{L,q} \\ \frac{dI_{L,q}}{dt} = \frac{1}{L}(U_{in,q} - U_{g,q} - I_{L,q}R) - \omega I_{L,d} \end{cases} \quad (6)$$

将 $U_{in}(0)$ 和 $I_L(0)$ 确定后, 即可用四阶龙格库塔法求解式(6), 从而得到电感电流 I_L , 在同步坐标下, 将 I_L 代入式(7)即得超级电容储能系统等效模型功率响应:

$$\begin{cases} P = U_{g,x}I_{L,x} + U_{g,y}I_{L,y} \\ Q = U_{g,y}I_{L,x} - U_{g,x}I_{L,y} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)和(7)一起构成了超级电容储能系统 2 阶动态综合等效模型。

3.3 辨识方法及初始条件的确定

参数优化方法采用前文超级电容单体辨识所用的辨识建模算法。以超级电容储能系统动态仿真数据作为实验数据样本, 误差函数 E_r 如式(8)所示^[18]:

$$E_r = \sqrt{\sum_{i=0}^N ((P(i) - P_m(i))^2 + (Q(i) - Q_m(i))^2) / N} \quad (8)$$

式中: N 为数据采样点数; i 为采样时刻点; $P(i)$,

$Q(i)$ 为 i 时刻的系统仿真功率响应; $P_m(i)$, $Q_m(i)$ 为 i 时刻的模型功率响应。

进行参数辨识, 首先必须确定状态方程初始条件, 模型中逆变器的交流侧电压 U_{in} 以及动态方程组中的状态变量 I_L 的初始值均由稳态条件求解, 这就保证了模型初始输出始终满足实际超级电容储能系统的动态过程初始条件^[19]。

$$\begin{cases} U_{in,x} = U_{g,x}(0) + \frac{P(0)R + Q(0)\omega L}{U_g(0)} \\ U_{in,y} = U_{g,y}(0) + \frac{P(0)\omega L - Q(0)R}{U_g(0)} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} I_{L,x}(0) = \frac{(P(0)R + Q(0)\omega L)R}{[R^2 + (\omega L)^2]U_g(0)} + \frac{(P(0)\omega L - Q(0)R)\omega L}{[R^2 + (\omega L)^2]U_g(0)} \\ I_{L,y}(0) = \frac{(P(0)\omega L - Q(0)R)R}{[R^2 + (\omega L)^2]U_g(0)} - \frac{(P(0)R + Q(0)\omega L)\omega L}{[R^2 + (\omega L)^2]U_g(0)} \end{cases} \quad (10)$$

计算 U_{in} , $I_{L,x}(0)$ 和 $I_{L,y}(0)$ 的具体方法如式 (9)~(10) 所示, 根据式 (9)~(10) 即可获得二阶动态微分方程 (6) 的初始条件: 即状态变量 I_L 初值的 d 轴和 q 轴分量 $I_{L,d}(0)$, $I_{L,q}(0)$ 及换流器出口恒定电压 U_{in} 的 d 轴和 q 轴分量 $U_{in,d}$, $U_{in,q}$ 。

3.4 综合等效模型的检验

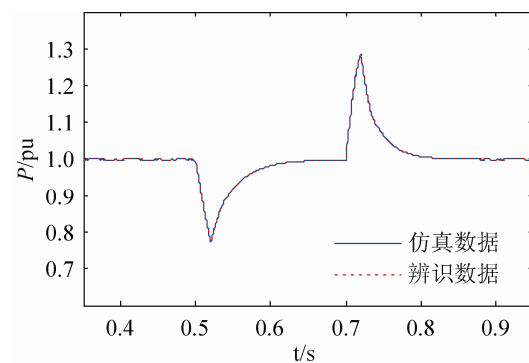
3.4.1 综合等效模型的描述能力

为验证本文提出的动态综合等效模型对超级电容储能系统的描述能力, 将超级电容储能系统接入 Matlab 仿真平台的 4 节点电网仿真系统, 在超级电容储能系统入网点母线处设置电压跌落故障 (三相短路), 使母线电压在 10%~60% 间跌落, 测得接入点处母线电压和超级电容储能系统注入母线的有功、无功功率。其中, 以电压为激励信号, 功率为响应输出, 采用综合改进的遗传算法对超级电容储能系统综合等效模型进行辨识建模, 模型结构如式 (6)~(7) 所示。表 4 为 8 组不同电压跌落程度实验数据的辨识结果。母线电压跌落 10%~60% 时

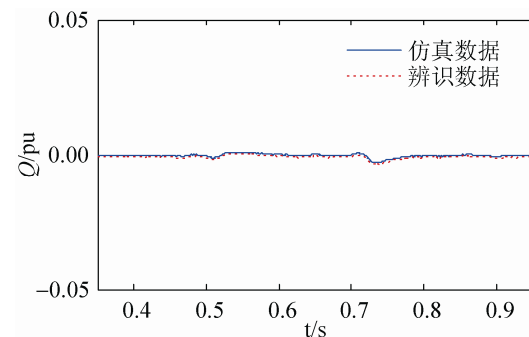
的仿真功率响应及其对应的模型功率响应对比曲线如图 10 (选取 U 跌落 30% 展示)。

表 4 超级电容综合等效模型参数辨识结果

编号	电压降/%	R/pu	L/pu	误差
1	10	6.45	$2.00\text{e-}3$	$3.30\text{e-}5$
2	15	6.45	$2.00\text{e-}3$	$7.60\text{e-}5$
3	20	6.94	$2.10\text{e-}3$	$1.39\text{e-}4$
4	25	6.88	$2.10\text{e-}3$	$2.29\text{e-}4$
5	30	6.86	$2.09\text{e-}3$	$3.50\text{e-}4$
6	35	6.88	$2.10\text{e-}3$	$5.10\text{e-}4$
7	40	6.90	$2.12\text{e-}3$	$7.23\text{e-}4$
8	60	7.00	$2.18\text{e-}3$	$2.72\text{e-}3$



(a) 电压跌落 30% 时的有功响应对比



(b) 电压跌落 30% 时的无功响应对比

图 10 等效模型辨识结果

从表 4 可以看到, 故障点电压跌落的程度相差较大, 但是辨识建模的误差仍维持在较低的范围。

由图 10 可得, 超级电容储能系统在动态过程中, 动态综合等效模型根据电压激励得到的功率响应能很好地拟合仿真系统功率数据, 表 4 中的超级电容等效描述模型辨识结果的相对误差也说明本文提出的超级电容储能系统综合等效模型具有较强的描述能力。证明在超级电容储能系统的动态负荷特性方面, 动态综合等效模型具有良好表现。

3.4.2 综合等效模型的参数稳定性

将前文所建立的动态综合等效模型的参数采用电压跌落 30% 时辨识所得的参数, 但是电压激励信号采用母线电压跌落为 40% 时的仿真数据, 在此激励下, 将模型功率输出与电压跌落 40% 时的仿真功率响应对比, 目的在于验证电压跌落 30% 时辨识所得的参数的稳定性。有功无功对比曲线如图 11 (选取 40% 展示)。

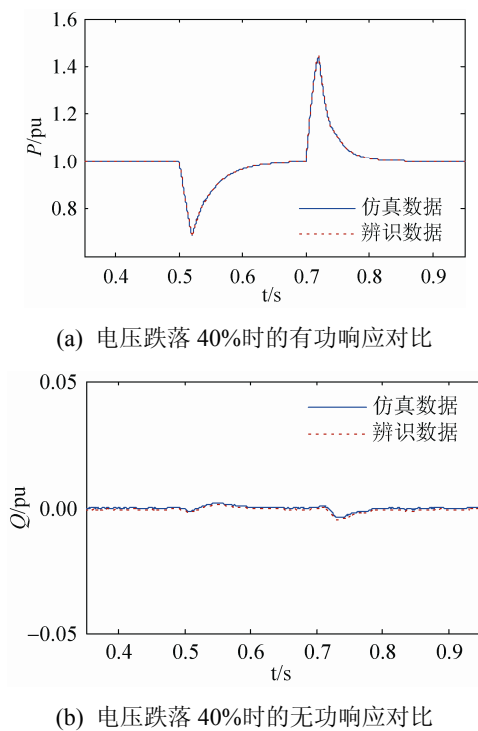


图 11 参数稳定性验证

将故障点电压跌落 10%, 20%, 35%, 40% 的仿真数据均进行了验证, 表 5 为 4 个数据组功率对比的误差, 误差计算方法仍采用式(8)的公式。

表 5 参数稳定性检验的误差

数据组	10%	20%	35%	40%
误差	3.20e-5	1.39e-4	5.10e-4	7.24e-4

检验结果表明: 电压跌落 30% 时的辨识参数, 尽管在不同大故障情况电压激励下, 仍有良好的描述能力, 证明了综合等效模型具有良好的参数稳定性。

3.4.3 综合等效模型的多类型仿真软件适用性

为了检验超级电容储能系统综合等效模型的

适用性, 基于电力系统机电暂态仿真软件 PSASP, 将搭建好的超级电容储能系统综合等效模型接入中国电科院 36 节点算例的节点 BUS26, 设置 1.11~1.50 S 时发生三相接地短路故障, 设置故障点分别距 BUS26 为 20%, 30%, 60% 三种情况, 3 种情况下得到的负荷特性如图 12 所示 (选取 20% 展示), U 为 BUS26 母线电压, P 和 Q 分别为算例中储能系统输出的有功功率和无功功率。

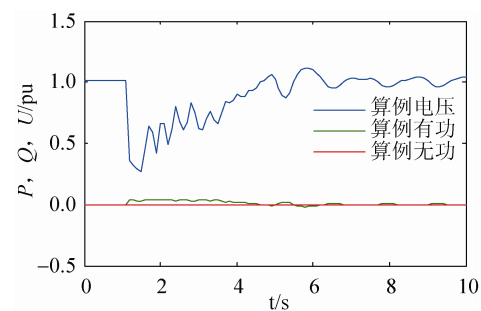


图 12 故障点距母线 20% 时负荷特性曲线

以算例中节点的输出电压作为激励, 作用于超级带容储能系统综合等效模型, 得到模型输出的有功与无功, 最后将模型输出的有功、无功与算例输出的有功、无功进行对比, 如图 13 (选取故障点距母线 30% 展示)。

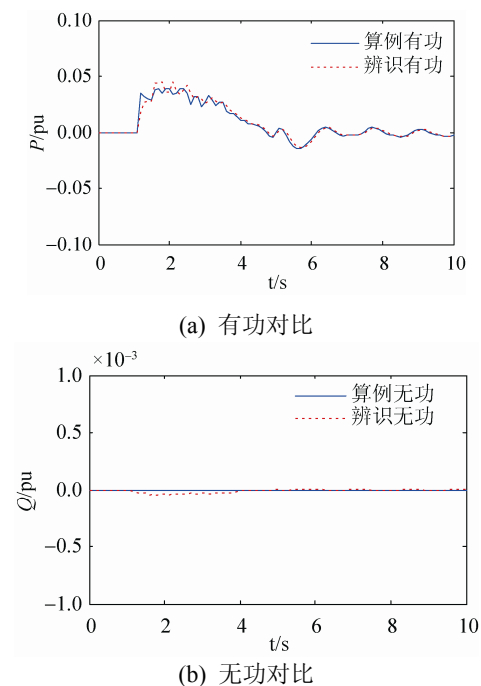


图 13 故障点距母线 30% 时功率对比

图 13 表明, 超级电容动态综合等效模型同样适合于电力系统暂态仿真软件 PSASP 的检验, 适用性良好, 为超级电容储能系统参与电网仿真奠定了基础。

3.4.4 综合等效模型的合理性及现实意义讨论

超级电容储能系统应用于复杂配网中时, 能够在短时间内(秒级)跟踪母线接入点的负荷特性, 从而吞吐功率, 这个时间尺度远大于母线点的电磁暂态时间常数, 所以超级电容储能系统在这一时间尺度内可认为是恒压源, 这是本文动态综合建模的理论依据。超级电容储能系统在动态过程中, 由于滤波回路的电流变化, 导致其产生了动态过程, 但由于逆变器的快速跟踪控制, 使得超级电容储能系统的无功输出变化较小。超级电容储能系统动态综合等效模型能够准确、有效地反映超级电容储能系统的稳态、动态特性, 同时经过 Matlab, PSASP 软件仿真平台的检验, 表明超级电容储能系统综合等效模型的描述能力良好, 参数稳定性好, 适用性高。

4 结论

单体建模方面, 通过对超级电容单体充放电特性的分析, 在以往超级电容等效电路模型的基础上, 建立了超级电容并网二阶模型, 相较于以往学者所建模型, 此模型更能体现储能系统并网的动态特性, 且模型简单, 参数易于辨识; 采用综合改进的遗传算法, 利用超级电容实物恒电流、恒功率两种工作模式下的充放电数据, 对并网二阶模型进行参数辨识与优化, 误差均在 2% 以下, 且通过多组数据比较分析表明, 超级电容二阶并网模型参数稳定性较好。

机电暂态模型(动态综合等效模型)方面, 在 Simulink/Matlab 软件平台上, 将超级电容与 PCS 联合构成储能系统接入多节点电网仿真系统, 通过对母线接入点设置电压跌落故障, 分析超级电容储能系统的动态特性, 提出了超级电容储能系统的动态综合等效模型, 采用综合改进的遗传算法对动态

综合等效模型进行参数辨识和优化; 仿真实验和辨识建模表明提出的超级电容动态综合等效模型具有良好的描述能力和参数稳定性; 并在电力系统暂态仿真软件 PSASP 中对综合等效模型的适用性进行了验证, 结果表明综合等效模型适用能力强。这为超级电容储能系统参与微网储能、电网二次调频、削峰填谷等应用场景奠定了理论和仿真基础, 具有现实意义。

参考文献:

- [1] 杨卫东, 姚建国, 杨胜春. 储能技术对未来电网发展的作用分析 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(2): 17-20.
- [2] 钱军. 考虑分布式发电的配电网综合负荷建模方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [3] 袁国辉. 电化学电容器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1-7.
- [4] Spyker R I, Nelms R M. Classical Equivalent Circuit Parameters for a Double-layer Capacitor [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), 2000, 36(3): 829-836.
- [5] Nelms R M, Cahela D R, Tatarchuk B J. Using a Debye polarization cell to predict double-layer capacitor performance [C]// Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 1999. USA: IEEE, 1999: 2411-2417.
- [6] Fouad Rafik, Gualous H, Gallay R, et al. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling [J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2007, 165(2): 928-934.
- [7] Marie-Francoise J N, Gualous H, Berthon A. Supercapacitor thermal and electrical behaviour modelling using ANN [C]// IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2 March 2006. USA: IEE, 2006, 153(2): 255-262.
- [8] 苏海芳. 氧化石墨烯/无机纳米粒子复合物制备及电容性质 [D]. 合肥: 安徽大学, 2012.
- [9] 李琛. 碳基超级电容器及其电气性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [10] 盖晓东, 杨世彦, 雷磊, 等. 改进的超级电容建模方法及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(2): 172-175.
- [11] 何春光. 超级电容器储能装置仿真建模及其应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [12] 李欣然, 金群, 刘艳阳, 等. 遗传策略的综合改进及其在负荷建模中的应用 [J]. 电网技术, 2006, 30(11): 40-46.

(下转第 799 页)