

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.004

超级电容器充电过程中的双重均压研究

芮丽莹¹, 黄学文², 朱孔军¹, 谢维泰¹, 吴义鹏¹

(1. 机械结构力学及控制国家重点实验室(南京航空航天大学), 江苏 南京 210016;

2. 华能山东如意(巴基斯坦)能源(私人)有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:超级电容器作为储能器件在工业领域有着广泛的应用。为提高超级电容器模块的输出特性,延长模块的使用寿命,以面向未来航空航天器瞬时功率的应用需求为基础,文中提出一种安全可靠的超级电容器双重均压技术。通过测量恒流充放电条件下超级电容器的充放电曲线及计算单体特征参数,揭示模块中单体的不一致性。在恒流充电过程中,双重均压电路以 Buck-Boost 电路为主要电路,开关电阻法电路作为备用电路,使模块实现充电时的动态电压均衡并在充电结束时达到额定电压值且不出现过充现象。双重均压电路解决了超级电容器模块中因单体不一致性所致的电压不均衡问题。

关键词:超级电容器;不一致性;开关电阻;Buck-Boost 变换;双重均压

中图分类号:TM53

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)03-0022-06

0 引言

超级电容器体积小、重量轻,具有动态响应快、充放电电流大、功率密度高、循环使用寿命长等优点^[1],在储能领域具有非常广阔的应用前景。在混合型光伏发电系统中,超级电容器作为电力存储装置优化运行配电网并削峰填谷^[2-3];在风力发电应用领域,利用超级电容器可降低风电的波动,在较宽的波动功率范围内可调节有功功率,同时稳定风电场母线电压并调节无功功率^[4]。在未来航空航天领域中,超级电容器的应用需求也会急剧增加,如机载电磁炮、激光武器的快速充放电需求^[5-6],飞行器的瞬时高功率电子对抗^[7]等。超级电容器为装备提供峰值功率,降低主供电电源的功率需求,从而减小设备重量及节约空间。单体超级电容器的额定电压通常较低,而存储的电能却与电容值和端电压相关,这需要将单体超级电容器进行串、并联组成模块化的高电压储能系统^[8-9]。由于制造工艺等因素影响,实际单体超级电容器初始状态参数会存在一定差异,进而导致超级电容器组输出性能下降,模块中容值较小的电容器出现过充过放,容值较大的单体却不能被完全利用,如何保证模块内单体工作的一致性从而提高储能利用率是超级电容器应用的技术难点之一^[10-11]。

目前超级电容器电压均衡电路拓扑分为能量耗散型均衡电路和能量转移型均衡电路^[12]。目前能量耗散型均压电路有:并联电阻法、稳压管法^[13]

和开关电阻法^[14]。能量耗散型电路具有结构简单,成本低的优点,但同时电路发热量大,电路能量损耗高。能量转移型电路有飞渡电容法^[15]、开关电感法^[16]、DC/DC 转换器法和变压器法^[17]。能量转移型均衡电路具有电路损耗低、均衡效率高、均衡速度快等优点,但同时电路的均衡控制策略则更为复杂,在硬件实现成本上也更高。此外,均衡控制算法也是研究的热点,文献[18]提出了一种在考虑电压、温度及模块中单体的老化因素的基础上最大限度地提高模块使用寿命的均衡控制算法。

文中以提高超级电容器储能模块的输出特性,延长使用寿命为目标,面向未来航空航天飞行器的瞬时功率应用需求,通过对超级电容器的特征参数进行测试并计算,为均压电路的必要性奠定基础。同时文中提出了一种双重可靠的超级电容器充电电压均衡技术:以 Buck-Boost 电压均衡电路为主,以开关电阻法为辅,该均压电路控制简单,且不需要检测各超级电容器两端的电压,可实现超级电容器模块充电过程中的动态均衡和防止过充,提高超级电容器模块均压系统的可靠性。

1 电容器特征参数与不一致性分析

超级电容器在工况应力、厂商制造、用户使用等各种因素作用下会导致单体的特性参数差异,如特征参数、荷电状态和放电深度、老化速率、温度梯度分布趋势、充放电能量分配等^[19-21]。

根据 IEC 62576 标准^[22],超级电容器的特征参数可通过测量恒定电流放电条件下电流-电压的响应时间来确定。为直观获得单体超级电容器的特

收稿日期:2020-11-18;修回日期:2020-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51672130)

征参数并分析其中的不一致性,在此对市场上不同厂家所生产的超级电容器共计 80 个进行了测试,其中标称电容值分别为 2 F, 5 F, 4.7 F 和 7 F 的各 20 个,标称电容值为 1 F 的超级电容器 40 个。

图 1 为某一公司产品在经过实际测试后,不同标称电容值对应的标准差及分散度,其标准差范围为 0.02~0.3, 电容值分散度上限为 +25%, 下限为 -15%。绘制该厂家所生产超级电容器的等效串联内阻值及其标准差,如图 2 所示。经计算,其等效串联内阻值的标准差范围为 0.2~0.38。

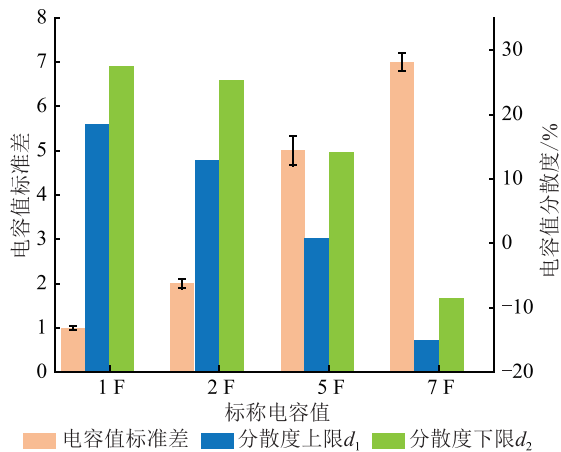


图 1 同一厂家超级电容器电容值标准差及分散度

Fig.1 Standard deviation and dispersion of capacitance values of supercapacitors produced by the same manufacturer

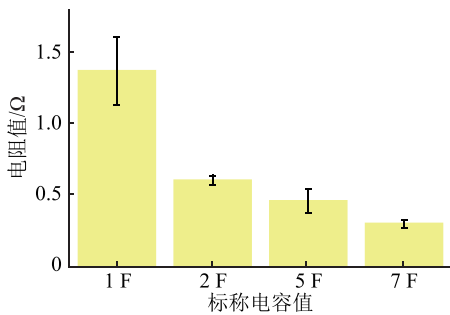


图 2 同一厂家超级电容器等效串联内阻值及标准差

Fig.2 Equivalent series resistance and standard deviation of supercapacitors produced by the same manufacturer

由图 1 和图 2 可知,对于同一厂家同一标称电容值的超级电容器,其实际电容值分散度及等效串联内阻值均随电容值的增大而减小,并且单体间实际电容值及等效串联内阻值的差异仍存在。

2 双重均压电路原理

目前,多数文献^[23-25]研究了超级电容器组在恒压充电时的电压均衡电路及其实现。恒压充电时充电电流随着超级电容器的荷电状态的变化进行

自动调整,避免了大电流对超级电容器的损害。而恒流充电可采用大电流对超级电容器组进行快速充电,充电效率高。在瞬时功率应用场景下,超级电容器组为满足应用需求应具备快速充放电的能力,故文中主要研究恒流充电模式下超级电容器组 2 种均衡电路的实现。

开关电阻法^[26]的均衡原理是利用电阻消耗电路中多余的能量。假设超级电容器模块由 n 个单体电容器串联组成。当其以恒定电流充电时,与单体电容器并联部分的开关处于断开状态,电容器两端电压呈直线上升趋势;当单体电容器两端电压达到设定最大充电电压时,相应的开关及时闭合,充电电流从对应电阻上流过,该单体电容器不再充电,维持在设置的最大充电电压状态,直至整个电容器模块充满电且单体之间达到电压均衡。当超级电容器模块处于开关电阻电压均衡模式时,为确保开关闭合时,充电电流全部从对应的电阻开关支路中流过,要求分流电阻 R 满足:

$$\frac{I_c R - V_c}{R_s + R} - \frac{V_c}{R_p} = 0 \quad (1)$$

式中: I_c 为充电电流; V_c 为电容器两端电压; R_s , R_p 分别为等效串联电阻和等效并联电阻值。

Buck-Boost 变换器法^[27]的均衡原理是在充放电过程中利用储能器件电感,通过开关的高频切换将能量从相邻 2 个电容器中单体电压较高的转移到单体电压较低的电容器中,从而实现充电过程中动态电压均衡的效果。当超级电容器模块处于 Buck-Boost 变换器电压均衡模式时,为了计算电路达到均衡条件时所需电感的最小值,假设 2 个超级电容器在 1 个开关周期内通过交换能量达到电压均衡,即 2 支电容器压差为零。然而,恒流充电条件下 2 支电容器均衡时的端电压远未到额定电压值,故应假设 2 个超级电容器在恒流充电条件下当电压充电至额定电压值时达到均衡状态。此时电容器两端电压等于电感两端电压且 2 支超级电容器电压差为零,同时考虑到电感上的电流最大值不应超过充电电流 I ,可估算电感的取值范围为:

$$L \geq \frac{V_c D_1 T}{I_L} \quad (2)$$

式中: V_c 为额定电压值; I_L 为电感上的电流值; D_1 为 PWM 高电平与周期的比例; T 为开关周期。考虑均衡时 2 支超级电容器在 1 个周期内变化的电压值一致,即:

$$L \frac{\Delta I}{D_1 T} = L \frac{\Delta I}{D_2 T - D_1 T} \quad (3)$$

式中： ΔI 为电感上的纹波电流； D_2 为 PWM 低电平与周期的比例。

当超级电容器模块中单体容值相差较大时，开关电阻电路均衡效率降低，分流电阻使得电路损耗增加。Buck-Boost 变换器电路在均压时不需要电压检测模块，这使得该电路存在过充危险。

文中提出一种双重均压电路，其电路结构如图 3 所示。

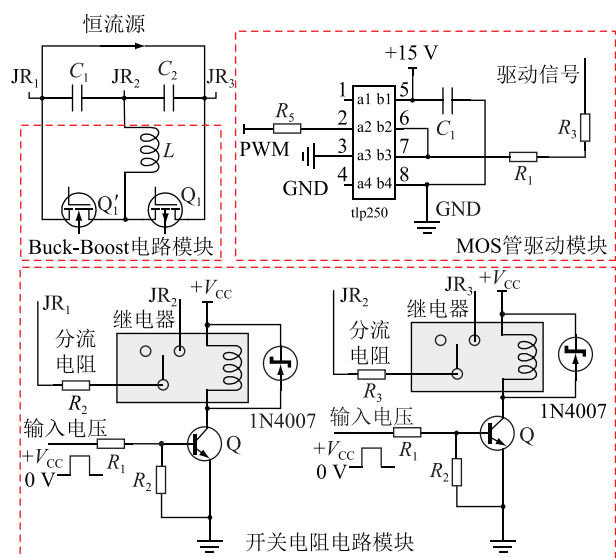


图 3 双重均压电路

Fig.3 Double voltage balancing circuit

由图 3 可知，该电路以 Buck-Boost 变换器电路和开关电阻电路为基础。以 2 支超级电容器为例，Buck-Boost 变换器电路和开关电阻均衡电路同时并联在超级电容器模块两端。Buck-Boost 变换器电路中开关使用 PMOS 管和 NMOS 管，仅需 1 套 MOS 管驱动电路就使得 PMOS 管闭合的同时 NMOS 管断开，实现充电过程中相邻 2 个超级电容器的能量交换。当超级电容器充电至额定电压时，开关电阻电路驱动模块驱动继电器闭合，使充电电流从分流电阻上流过，维持单体电压在额定电压值附近。在双重均压电路中，当 Buck-Boost 变换器均衡电路正常工作时，超级电容器组实现恒流充电时的动态电压均衡；若 Buck-Boost 变换器均衡电路失效时，开关电阻均衡电路替代 Buck-Boost 变换器电路进行工作，防止充电过程中出现过充的安全隐患。

考虑超级电容器在未来航空航天领域的应用，均压控制系统有必要冗余 1 套控制方法，双重均压电路可有效提高均压系统的可靠性、降低系统故障率。双重均压电路可以解决 Buck-Boost 变换器电路过充的隐患，当超级电容器模块均衡充电至额定电压时，开关电阻电路工作使电容器单体电压维持在

额定电压值附近；同时 Buck-Boost 变换器电路的动态均压效果可以缩小单体间不一致性，降低开关电阻电路的电路损耗，两套电路相辅相成。

3 仿真分析

利用 LTspice 电路仿真软件进行双重均压电路的仿真验证和分析。选取额定电压为 2.7 V，电容值分别为 3.3 F、4 F、6 F、10 F 的 4 支超级电容器，其对应的等效串联内阻值为 0.25 Ω 、0.2 Ω 、0.2 Ω 、0.27 Ω ，等效并联电阻值设置为 500 Ω 。设定模块恒定充电电流值为 0.5 A，脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 信号的频率和占空比为 20 kHz 和 0.5。电路中分流电阻和电感经计算为 2.192 Ω 和 135 μH 。

图 4 为双重均压电路仿真结果。仿真开始时，设置超级电容器的初始电压为零；在 $t = 10$ s 之前，电路中的均衡电路仅 Buck-Boost 变换器均衡电路处于工作状态，4 支超级电容器达到动态电压均衡状态，其两端电压均为 0.95 V；在 $t = 10$ s 时，Buck-Boost 变换器均衡电路失效，此时电路中无均衡电路工作，超级电容器两端电压随充电时间线性上升，此时 4 支超级电容器电压之间存在压差，存在过充的危险；当超级电容器组某个单体电压充电至 2.4 V 时，开关电阻均衡电路处于工作状态，维持其端电压保持在 2.4 V 不变并保持至充电结束；当 4 支超级电容器均充电至 2.4 V 时，充电结束并达到了充电均衡的效果。

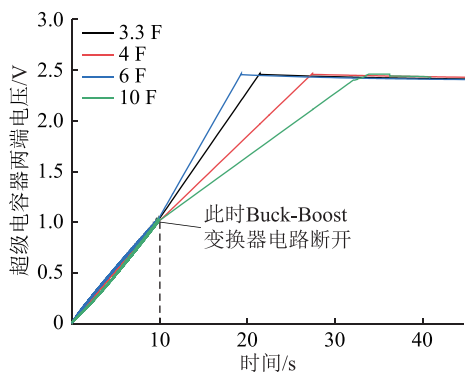


图 4 双重均压电路仿真结果

Fig.4 Simulation results of double voltage balancing circuit

4 实验验证

以 4 支超级电容器为例搭建实验电路进行验证，电路工作流程如图 5 所示。

将 4 支超级电容器串联成模块并以恒定电流进行充电，Buck-Boost 变换器电路模块和开关电阻均

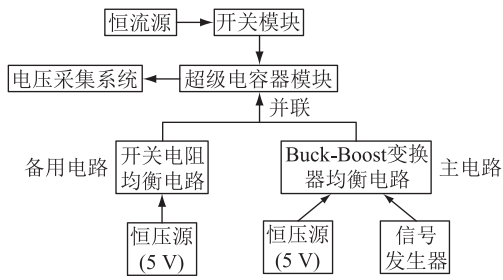


图5 双重均压电路实验示意

Fig.5 Double voltage balancing circuit

衡备用电路均并联在超级电容器组两端,其中 Buck-Boost 变换器电路模块需要 3 个。均衡电路中设置恒流源充电电流为 0.5 A, MOS 管的切换频率为 20 kHz, 占空比为 0.5, 电感线圈取值为 330 μH , 放电电阻设置阻值为 2.2 Ω 。

图 6 为 4 支超级电容器模块的双重均压实验结果。

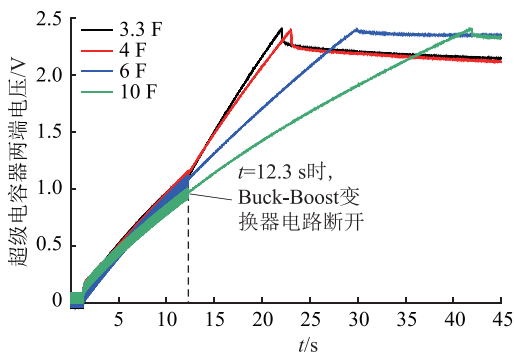


图6 双重均压电路实验结果

Fig.6 Experimental results of double voltage balancing circuit

在 $t = 12.3 \text{ s}$ 之前, Buck-Boost 变换器电路正常工作, 超级电容器单体以 0.5 A 的恒定电流进行充电并实现了充电过程中的动态电压均衡; 在 $t = 12.3 \text{ s}$ 时, 15 V 恒压源断开, Buck-Boost 电路失效, 此时 4 支超级电容器电压差最大值为 0.16 V; 在 $t = 12.3 \text{ s}$ 之后, 当超级电容器单体充电至 2.4 V 时, 开关电阻电路开始工作, 实现了充电时的静态电压均衡。当 4 支超级电容器均充电至 2.4 V 时, 模块充电结束。模块充电时间为 41.8 s。

实验结果表明双重均压电路的有效性。与前述 2 种电路相比, 双重均压电路可以有效实现超级电容器模块充电过程中的动态均衡和防止过充的功能, 提高超级电容器模块电压均衡的可靠性和输出性能。电路中 Buck-Boost 变换器均衡电路可在超级电容器充电过程中实现动态电压均衡。当其失效时, 备用电路开关电阻均衡电路可防止超级电容器模块出现过充的安全问题, 有效地提高了超级电

容器模块电压均衡的可靠性, 降低了均压系统的故障率。

5 结语

文中的超级电容器模块测试结果表明超级电容器等效内阻值和分散度随其电容值增加而减小, 同一厂家所生产的超级电容器不同单体之间客观存在不一致性。面向未来航空航天飞行器的应用需求, 文中在上述 2 套均压电路设计的基础上提出了 1 套恒流充电模式下超级电容器双重均压系统并在仿真中验证其可行性。该套电路以 Buck-Boost 变换器均衡电路为主, 以开关电阻模拟均衡电路为辅, 在实现超级电容器单体电压动态均衡的同时防止其出现过充的安全问题。该电路解决了因单体不一致问题所造成的超级电容器模块输出性能下降的问题, 提高了均压系统的输出性能及可靠性, 降低了故障发生率。

本文得到江苏省 333 项高层次人才培养专项基金项目 (BRA2017424); 国网江苏省电力有限公司科技项目 (J2019046) 资助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] GONZÁLEZ A, GOIKOLEA E, BARRENA J A, et al. Review on supercapacitors: technologies and materials [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 1189-1206.
- [2] 吴霜, 季聪, 孙国强. 含分布式储能的配电网多目标运行优化策略研究 [J]. *电力工程技术*, 2018, 37(2): 20-26.
WU Shuang, JI Cong, SUN Guoqiang. Multiple objection operation strategy optimization research of distribution network including distributed energy storage [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(2): 20-26.
- [3] 聂聪颖, 沈小军, 吕洪, 等. 并网型风电场氢超混合储能容量配置及控制策略研究 [J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 1-8.
NIE Congying, SHEN Xiaojun, LYU Hong, et al. Capacity configuration and control strategy of hydrogen super hybrid energy storage in grid connected wind farm [J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 1-8.
- [4] 黄晓斌, 张熊, 韦统振, 等. 超级电容器的发展及应用现状 [J]. *电工电能新技术*, 2017, 36(11): 63-70.
HUANG Xiaobin, ZHANG Xiong, WEI Tongzhen, et al. Development and applications status of supercapacitors [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2017, 36(11): 63-70.
- [5] 李如年, 王敬, 王海. 新概念动能武器—电磁炮 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2011, 6(2): 125-129.
LI Runian, WANG Jing, WANG Hai. The new concept of kinetic energy weapon—EM Gun [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2011, 6(2): 125-129.
- [6] 姜锦锋, 张著, 高光波. 机载激光武器储能供电研究 [J]. *航*

- 空制造技术,2018,61(19):84-91.
- JIANG Jinfeng, ZHANG Zhu, GAO Guangbo. Study on energy storage and power supply of airborne laser weapon[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(19):84-91.
- [7] CHIN K B, BRANDON E J, BUGGA R V, et al. Energy storage technologies for small satellite applications[C]//Proceedings of the IEEE. IEEE:419-428.
- [8] LIBICH J, MÁCA J, VONDRÁK J, et al. Supercapacitors: properties and applications[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 17: 224-227.
- [9] MUZAFFAR A, AHAMED M B, DESHMUKH K, et al. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 123-145.
- [10] YANG H Z, ZHANG Y. Characterization of supercapacitor models for analyzing supercapacitors connected to constant power elements[J]. Journal of Power Sources, 2016, 312: 165-171.
- [11] DEVILLERS N, JEMEI S, PÉRA M C, et al. Review of characterization methods for supercapacitor modelling[J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 596-608.
- [12] 胡国文, 李超, 林萍. 超级电容器电压均衡技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2014, 51(22): 22-29.
- HU Guowen, LI Chao, LIN Ping. Research overview of ultra-capacitor voltage equalization technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(22): 22-29.
- [13] PANTAZICA M, DRUMEA A, MARGHESCU C. Analysis of self discharge characteristics of electric double layer capacitors [C]//2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). Constanta, Romania. IEEE, 2017: 90-93.
- [14] OKAMURA M. A basic study on power storage capacitor systems[J]. Electrical Engineering in Japan, 1996, 116(3): 40-51.
- [15] PHUNG T H, COLLET A, CREBIER J C. An optimized topology for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4603-4613.
- [16] 许爱国, 谢少军, 刘小宝. 串联电容器动态电压均衡技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 111-116.
- XU Aiguo, XIE Shaojun, LIU Xiaobao. Dynamic voltage equalization technique for series connected ultra-capacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 111-116.
- [17] SHILI S M, HIJAZI A, SARI A, et al. Online supercapacitor health monitoring using a balancing circuit[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 7: 159-166.
- [18] 顾帅, 韦莉, 张逸成, 等. 超级电容器不一致性研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2862-2869.
- GU Shuai, WEI Li, ZHANG Yicheng, et al. Review of nonuniformity research and analysis on supercapacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2862-2869.
- [19] 陈雪丹, 陈硕翼, 乔志军, 等. 超级电容器的应用[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(6): 800-806.
- CHEN Xuedan, CHEN Shuoyi, QIAO Zhijun, et al. Applications of supercapacitors[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(6): 800-806.
- [20] SAKKA M A, GUALOUS H, VAN MIERLO J. Characterization of supercapacitors matrix[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(25): 7532-7537.
- [21] 佩塔尔 J. 格尔波维奇. 超级电容器在功率变换系统中的应用、分析与设计从理论到实际[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- GRBOVIC P J. Ultra-capacitors in power conversion systems: applications, analysis, and design from theory to practice[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [22] GALLARDO-LOZANO J, ROMERO-CADAVAL E, MILANES-MONTERO M I, et al. Battery equalization active methods[J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 934-949.
- [23] LI H, PENG J, HE J P, et al. Synchronized cell-balancing charging of supercapacitors[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 3338-3343.
- [24] IBANEZ F M. Analyzing the need for a balancing system in supercapacitor energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2162-2171.
- [25] 王志鹏, 韦莉, 顾帅, 等. 超级电容器均衡方案设计综述[J]. 电器与能效管理技术, 2015(18): 55-60, 63.
- WANG Zhipeng, WEI Li, GU Shuai, et al. Review on design of super capacitor cell balancing scheme[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(18): 55-60, 63.
- [26] PHUNG T H, COLLET A, CREBIER J C. An optimized topology for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4603-4613.
- [27] 李海冬, 冯之钺, 齐智平. 一种超级电容器快速电压均衡方法的研究[J]. 电源技术, 2007, 31(3): 186-190.
- LI Haidong, FENG Zhiyue, QI Zhiping. Study on a rapid voltage balancing method for supercapacitor[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2007, 31(3): 186-190.

作者简介:



芮丽莹

芮丽莹(1994),女,硕士在读,研究方向为智能传感技术及系统(E-mail: rly@nuaa.edu.cn);

黄学文(1985),男,学士,高级工程师,从事新能源及储能技术的研究和应用工作;

朱孔军(1971),男,博士,教授,研究方向为储能材料及系统。

(下转第 91 页)

Optimal feature selection of load power models

YAN Xueying¹, QIN Chuan¹, JU Ping¹, CAO Lu², LI Jianhua²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. East China Grid Corporation, Shanghai 200120, China)

Abstract: Load power fluctuation characteristics differ in time and space owing to many influencing factors. It is of great importance to determine the input features for load power modeling. This paper focuses on the feature selection of short-term power models. The purpose of this paper is to find the optimal set from the features including historical load, weather and date. Firstly, maximum information coefficient, recursive feature elimination method based on support vector machine and random forest are used for feature selection respectively. Secondly, the optimal feature set search strategy based on genetic algorithm is proposed according to the contrastive analysis. Finally, the optimal set of input features is finally determined. An example of calculation is carried out based on the bus load data of a 220 kV substation in a certain area. Compared with the load forecasting results of each feature selection method, the effectiveness and accuracy of the proposed feature selection method in short-term load forecasting have been verified.

Keywords: load power model; feature selection; genetic algorithm; XGBoost; load forecasting

(编辑 李栋)

(上接第 26 页)

Double voltage equilibrium in supercapacitor-based charging process

RUI Liying¹, HUANG Xuewen², ZHU Kongjun¹, XIE Weitai¹, WU Yipeng¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), Nanjing 210016, China;

2. Huaneng Shandong Ruyi (Pakistan) Energy (private) Co., Ltd., Ji'nan 250014, China)

Abstract: As an energy storage device, supercapacitors are widely used in the industrial field. In order to improve the output characteristics and extend the life of supercapacitor modules, a double voltage balancing technology for supercapacitor module is proposed in this paper, which is based on the requirements of the instantaneous power for future aerospace vehicles. The charge and discharge curves of supercapacitors under constant current conditions are measured to evaluate the characteristics of cells, which reveals their inconsistency. In the constant process of current charging, the double voltage balancing circuit uses the Buck-Boost converter circuit as the main circuit, and the switched resistance circuit acts as a backup circuit. The cell in the module achieves dynamic voltage balance during charging and reaches the rated voltage value at the end of charging without overcharging. The double voltage balancing circuit solves the problem of voltage imbalance caused by the inconsistency of monomers in the supercapacitor module.

Keywords: supercapacitor; non-uniformity; switch-resistance method; Buck-Boost converted method; double voltage balancing circuit

(编辑 李栋)