

Балансировка ультраконденсаторов последовательно соединённых в батарею в приложениях с малым рабочим циклом

Распределение напряжения в батарее из последовательно соединённых «ультраконденсаторов» изначально является функцией ёмкости. После того, как батарея находится под напряжением в течение некоторого времени, распределение напряжения становится функцией внутреннего параллельного сопротивления (тока утечки).

Рассмотрим, например, батарею из 20 конденсаторов, изначально заряженную до 50 В. Если отдельные конденсаторы имеют одинаковую ёмкость, напряжение должно делиться равномерно, и каждый конденсатор будет заряжен до 2,5 Вольт. Если конденсаторы имеют какие-либо отклонения ёмкости, напряжения отдельных элементов будут варьироваться в зависимости от их ёмкости. Элементы с большей ёмкостью будут заряжены до более низких напряжений, а элементы с меньшей ёмкостью — до более высоких напряжений. Это связано с тем, что каждая ячейка проводит один и тот же ток, а напряжение является функцией тока и ёмкости. Среднее напряжение по-прежнему будет 2,5 вольт (50 вольт / 20 элементов).

Любой элемент под напряжением разряжается через внутреннее «параллельное сопротивление». Ток через это параллельное сопротивление называется током утечки. Ток утечки является проявлением эффекта саморазряда элемента.

Через некоторое время нахождения под напряжением, напряжения на отдельных элементах будут меняться в зависимости от различий в токе утечки, а не от различий в ёмкости. Элементы с большей утечкой будут иметь более низкое напряжение и наоборот. Это происходит потому, что более высокий ток утечки разряжает элемент, понижая его напряжение. Затем это напряжение будет перераспределено на другие элементы батареи (при условии, что батарея остаётся подключённой к источнику постоянного напряжения).

Один из способов компенсации *изменений* тока утечки заключается в параллельном подключении к каждому конденсатору параллельного (байпасного, обходного) резистора, величина тока через который должна превышать ток утечки элемента. Это эффективно уменьшает влияние разброса эквивалентного параллельного сопротивления разных элементов. Например, если элементы имеют средний ток утечки $10 \pm 3 \text{ мкА}$, 1%-ый резистор, который будет обеспечивать ток 100 мкА , может быть подходящим выбором. Средний ток утечки теперь будет $110 \pm 4 \text{ мкА}$. Введение этого резистора уменьшит разброс тока утечки с 30% до 3,6%.

Если все параллельно подключённые сопротивления одинаковы, элементы с более высокими напряжениями должны разряжаться через параллельное сопротивление с большей скоростью, чем элементы с более низкими напряжениями. Это поможет равномерно распределить общее напряжение между конденсаторами батареи.

Разработчик системы должен учитывать влияние повышенного тока утечки из-за добавленных для балансировки параллельных резисторов. Типичный компромисс — время для баланса / ток утечки: чем быстрее реагирует балансировочная цепь, тем больше утечка. Уравновешивание сильно несбалансированной батареи, характеризующейся отношением тока байпаса к току утечки элемента 100:1, может занять несколько дней, а при отношении 10:1 — несколько часов. Как только батарея сбалансирована, время отклика становится менее важным, если батарея не работает по жёсткому циклу.

Для приложений с большим рабочим циклом Maxwell Technologies рекомендует применять активную балансировку.

Cell Balancing in Low Duty Cycle Applications

Voltage distribution in a series stack of ultracapacitors is initially a function of capacitance. After the stack has been held at voltage for a period of time, voltage distribution then becomes a function of internal parallel resistance (leakage current).

For example, consider a stack of 20 capacitors initially charged to 50 volts. If the cells have identical capacitance, the voltage should divide evenly, so that each capacitor charges up to 2.5 volts. If the cells have any variation in capacitance, individual cell voltages will vary based on capacitance. The cells with greater capacitance will be charged to lower voltages, and the cells with smaller capacitance will be charged to higher voltages. This is because each cell conducts the same current, and voltage is a function of current and capacitance. The average voltage will still be 2.5 volts (50 volts / 20 cells).

Any cell at voltage discharges through an internal "parallel resistance". The current through this parallel resistance is referred to as leakage current. The leakage current has the effect of self-discharging the cell.

After some time held at voltage, the voltages on the individual cells will vary based on the differences in leakage current, rather than on the differences in capacitance. The cells with higher leakage should have lower cell voltages, and vice versa. This is because the higher leakage current discharges the cell, lowering its voltage. This voltage must then be redistributed onto other cells in the series (provided the series string is held on a constant voltage source).

One technique to compensate for variations in leakage current is to place a bypass resistor in parallel with each cell, sized to dominate the total cell leakage current. This effectively reduces the variation of equivalent parallel resistance between the cells. For instance, if the cells have an average leakage current of 10uA +/- 3uA, a 1% resistor which will bypass 100uA may be an appropriate choice. The average leakage current will now be 110uA, +/- 4uA. Introduction of this resistor has decreased the variation in leakage current from 30% to 3.6%.

If all the parallel resistances are the same, the cells with higher voltages should discharge through the parallel resistance at a higher rate than the cells with lower voltages. This will help to distribute the total stack voltage evenly across the entire series of capacitors.

The system designer must consider the effect of increased leakage current due to the addition of bypass resistors for balancing. A typical trade is based on time to balance vs. leakage current; the faster the balancing circuit responds, the greater the leakage. A 10:1 ratio of bypass leakage current to cell leakage current may take a few days to balance a severely unbalanced system, where a 100:1 ratio may balance in a few hours. Once the system is balanced, response time is less of an issue unless a system is being severely cycled.

For high duty cycle applications, Maxwell Technologies recommends active balancing. For more information, please contact us at the addresses below.

Maxwell Technologies, Inc.
9244 Balboa Avenue, San Diego, CA 92123
United States
Phone: +1-858-503-3300
Fax: +1-858-503-3301

Maxwell Technologies SA
CH1728 Rossens
Switzerland
Phone: +41 (0) 26 411 85 00
Fax: +41 (0) 26 411 85 05