

## 磷酸铁锂电池均衡技术综述

**摘要：**为了达到规模储能的电压和容量要求，磷酸铁锂电池需通过串并联达到设计要求，而生产、使用过程的差异性导致的电池单体不一致性，是影响储能电站寿命主要因素之一。文章从规模储能技术基本概念出发，介绍了现有均衡方案的基本拓扑结构和控制策略，列举了两种实际应用方案，提出了各种方案的优劣与发展趋势，旨在对提高规模储能的经济性研究提供有益的启发。

### 0引言

规模储能电站一般设计容量较大，需要多个电池单体串并联以达到设计要求。以磷酸铁锂电池为例，单节工作电压范围通常约为2.8~4V，若每个电池单体为200Ah，额定电压3.2V，需要达到2.4MWh的容量，可以将252节电池单体串联成电池组，再并联15个电池组，则： $3.2V \times 252 \text{节} \times 200\text{Ah} \times 15 \text{组} = 2.42\text{MWh}$ ；直流侧电压806.4V。

在电芯批量生产过程中，由于原料及生产工艺的波动，电芯的容量、内阻、电压及自放电率均会有一些的偏差，同时在电芯使用过程中随着充放电循环次数增加及存储时间、温度等影响，电芯容量衰减也会出现不一致，导致在同一电池组内的电芯出现不一致。在规模储能中，电池组的不均衡性是影响电池组性能，降低电池组寿命的主要原因之一。

### 1规模储能常用概念

电池容量是指在一定条件下(放电倍率、温度、放电截止电压等)电池放出的电量，用字母c表示，单位为安时(Ah)。按照QB/T2502-2000《锂离子蓄电池总规范》，电池的额定容量为在环境温度为(20±5)℃时，以0.2C倍率放电至终止电压时的容量。

电池内阻分为欧姆内阻和极化内阻，欧姆内阻由电极材料、电解液、隔膜电阻及各部分零件的接触电阻组成，欧姆电阻不随激励信号频率变化，在同一充放电周期内，欧姆电阻除温升影响外几乎不变。极化内阻是指电化学反应时由极化引起的电阻，包括电化学极化和浓差极化引起的电阻。内阻是电池最为重要的特性参数之一，它是表征电池寿命以及电池运行状态的重要参数，是衡量电子和离子在电极内传输难易程度的主要标志。

电池的工作电压是指电池接通负载后，测得的正极与负极之间的电压。在放电时，电池的工作电压低于开路电压，这是由于两极极化和内阻存在的原因。在充电时，工作电压高于开路电压，而且随着充电的进行而上升，直到充满。

荷电状态SOC(state of charge)：电池剩余容量与额定容量的比值，常用百分数表示。

电池组的不一致性是指同一规格、同一型号的电池串或并联成组后，其电压、内阻、电荷量等参数存在一定的差别。根据不一致性对电池组性能的影响方式和对使用中不一致性扩大的原因，可以把电池的不一致性分为容量不一致、电阻不一致和电压不一致。

### 2影响电池一致性的因素及缓解措施

#### 2.1影响电池一致性的因素

磷酸铁锂电池在成组应用时出现不一致性问题的产生原因是多方面的，主要源自于生产中工艺和材料的不一致，其次源于运行中环境的不一致。

一是生产时导致的不一致性，主要是指电池在生产过程中由于工艺上的问题以及材质的不均匀，造成电池之间在初始容量、直流内阻、自放电现象和充放电效率等性能方面存在差异。如锂电池电极极板的质量、厚度、面积、涂片厚度不完全相同；极组的焊接质量直接影响锂离子电池的欧姆电阻一致性；电池内杂质的多少决定着电池的自放电率的大小；电解液的质量、密度和注入量对电池容量影响很大等。

#### 2.2运行中电池组不一致性扩大原因分析

在使用过程中，电池初始性能参数的差异在使用过程中形成累积并放大，主要表现在容量和内阻上。

(1)容量衰减速度不同，导致可用容量不同。

由于电池组中各单体电池吸收电流的能力不同，在充放电循环中，各单体电池的库仑效率不完全相同，导致电池的可用容量逐渐形成差异。当各单节电池间容量存在着一定差异时，容量小的电池最先被充满，而此时电池组充电过程并未结束，小容量电池由于过充，容量会继续减小。放电过程中，小容量的电池又会最先被放完电，由于电池组这时仍然在继续放电，小容量电池会过放，使得其容量进一步减小。这种不一致性经过多个充放电周期后会变得更加严重，甚至会对电池的循环寿命造成严重影响。

(2)电池内阻的不一致造成工作温度不同、放电深度不同。

对于串联的电池组串，放电过程电流大小相等，内阻大的电池，能量损失大，产生热量多，温度升高快，使化学反应速率加快，温度持续升高会造成电池变形或爆炸的严重后果。在充电过程中，内阻较大的电池单分配到的充电电压较高，相比其他电池，会提前到达预设的充电截止电压，此时为防止该单体过充，能量管理系统会停止整组充电，多次循环后，不一致性扩大。

对于并联的电池组串，在放电过程中，放电电流大小与内阻成反比，因此放电电流不同，电池放出能量不同，使相同工作条件下的电池放电深度不同。

## 2.3 相关标准要求

目前针对规模储能电池一致性测试方法及规范还没有相应标准，只在QC/T43-2006《电动汽车用锂离子蓄电池》中明确了不一致性测试及分析方法，即根据简单模拟工况下的试验数据分析蓄电池模块一致性。

该标准规定每一批产品出厂前应在该批产品中随机抽样进行出厂检验，对出厂检验的20 放电性能检验项目，所有蓄电池样品的3h倍率放电容量差应不大于 $\pm 5\%$ 。用于风光储储能示范电站的比亚迪电池出厂前将容量不一致性控带0在 $\pm 2\%$ 以内。

## 2.4 缓解电池不一致的措施

电池厂商在保证电池组的一致性时主要采取以下几方面措施：

(1)电池出厂前一方面提高工艺一致性水平，另一方面是对即将成组的电池单体以电压、内阻为标准进行筛选，加强匹配度。

(2)在使用中加强维护，定时测量电池单体电压，对电压异常的单体及时进行调整更换，对电压测量中电压偏低的电池，进行单独充电，使其性能恢复。

(3)避免电池过充电、深度放电，磷酸铁锂电池在SOC小于10%或大于90%时，电压变化率较大，容易失控。

(4)对电池组加装能量均衡系统，对电池组充放电进行智能管理。

综上，影响锂电池不一致性的客观因素很多，不论在生产中还是使用中都是难以避免的。不一致性对整组寿命的影响是影响规模储能经济性的重要因素。本文针对措施(4)均衡系统进行研究。

## 3 均衡电路拓扑结构

电池组均衡电路，是指给电池组另外配一套电路和控制管理系统，保证电池组内各单体电池荷电状态相同，防止电池组在使用过程中的过充及过放，使电池组性能不受损害。

目前常用的磷酸铁锂电池均衡电路分两种：能量耗散型电路和非能量耗散型电路。能量耗散型电路较为简单，非能量耗散型电路分为两种：一种是由储能元件(电感或电容)和控制开关组成，另一种主要是应用DC—DC变换技术，控制电感、电容这些储能元件实现能量过渡，达到对电池单体补电或放电的目的。

### 3.1 能量耗散型

能量耗散型的均衡电路基本结构如图1所示，电池 $B_1$ 、 $B_2$ ..... $B_n$ 分别并联分流电阻 $R_1$ 、 $R_2$ ..... $R_n$ ，当电池 $B_1$ 的电压过高时，控制电路将旁路控制开关 $S_1$ 合上，对应的分流电阻 $R_1$ 发热，阻止 $B_1$ 电压高于其他单体电压。通过控制电路反复检测，多轮循环后，达到整组一致。该方法的优点是结构简单，可靠性高，成本低。缺点是能耗较大，均衡速度慢，效率低，且电阻散热会影响系统正常运行，因此只适用于容量较小的电池组。

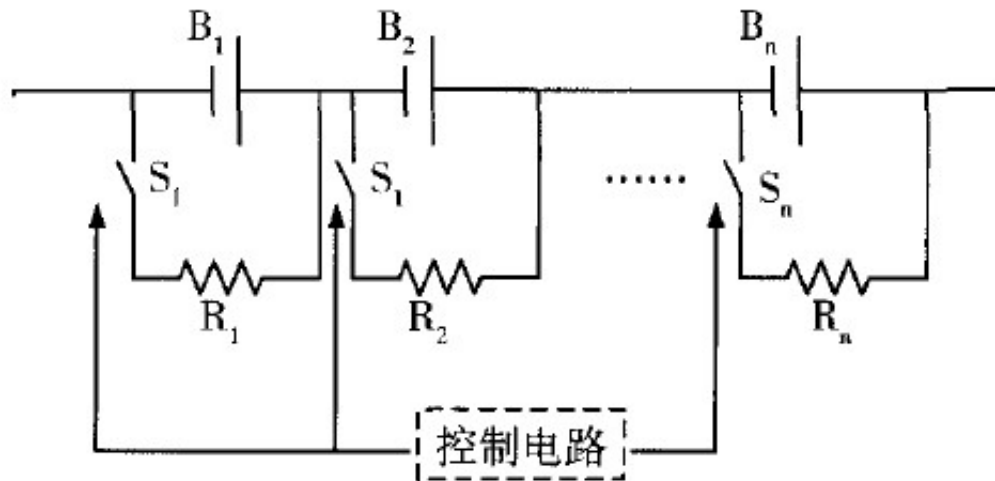


图 1 能量耗散型均衡电路

### 3.2 开关电容法非能量耗散型

开关电容法拓扑如图2所示，电容 $c$ 通过各级开关的通断，存储电压较高的电池单体能量，再释放给电压较低的电池单体。

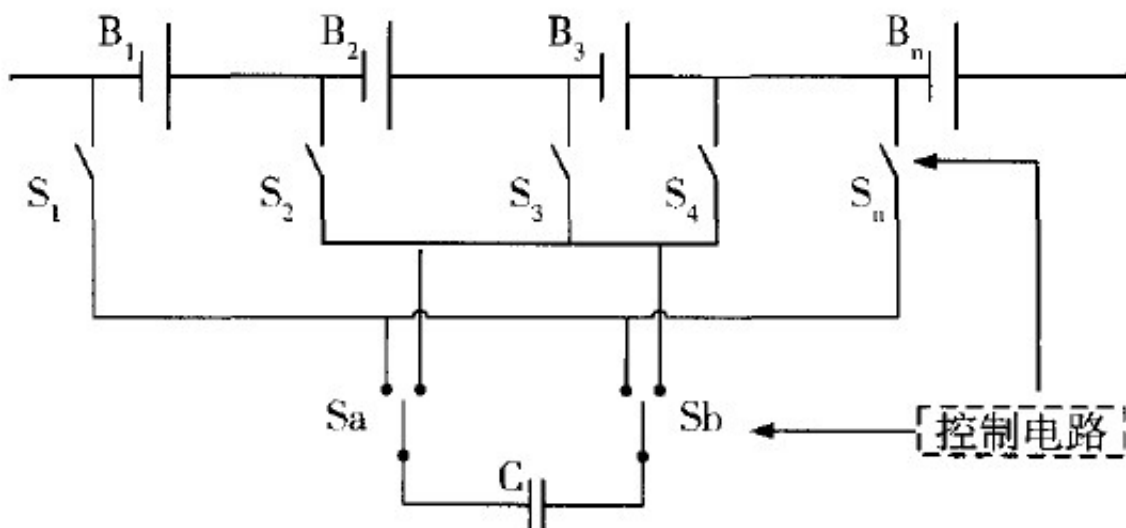


图 2 开关电容法拓扑 I

该拓扑中的储能元件可以是电容或电感，原理相似。这种均衡方法的结构简单，容易控制，能量损耗比较小，但当相邻电池的电压差较小时，均衡时间会较长，均衡的速度慢；均衡效率低，对大电流快速充电的场合不适用。

### 3.3 DC-DC变流器法非能量耗散型

利用DC—DC变流器均衡的电路拓扑主要分为集中式和分布式两种。从理论上讲没有损耗，均衡速度快，是现在锂

电池均衡的主流方案。

### 3.3.1 集中式变压器均衡法

正激式和反激式两种结构分别如图3(a)、(b)所示，每个电池单体并联一个变压器副边绕组，各副边绕组匝数相等，使得电压越低的单体能够获得的能量越多，从而实现整个组的均衡。

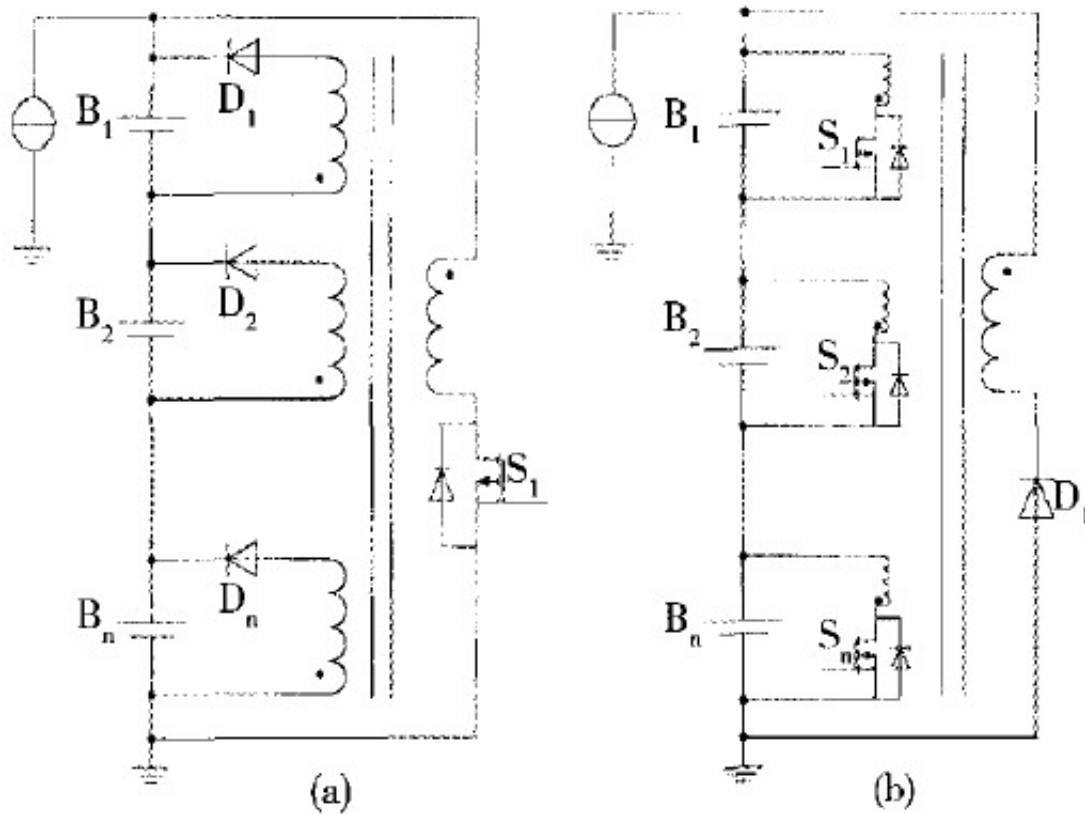


图3 集中式变压器均衡法拓扑结构

这种均衡结构的优点是均衡速度快，效率高，损耗低。缺点是当电压比较高、电池组串联电池数量比较多时，变压器的副边绕组的精确匹配难度就会较大，变压器的漏感所造成的电压差也很难补偿，元件多，体积大不易于模块化，开关管耐压高。

### 3.3.2 分散式均衡法

分散式均衡法的结构是给每个单体配置一个并联均衡电路，分为带变压器的隔离型电路和非隔离型电路。

#### (1) 非隔离型拓扑

非隔离型拓扑是基于相邻单体均衡的双向均衡，因不带变压器结构比较简单，比较适用于串联电池组数目较小的场合。Buck—Boost电路和丘克电路是两种比较常见的拓扑结构，如图4所示。其控制策略是在相邻单元间压差达到允许范围内时均衡电路即可停止工作。

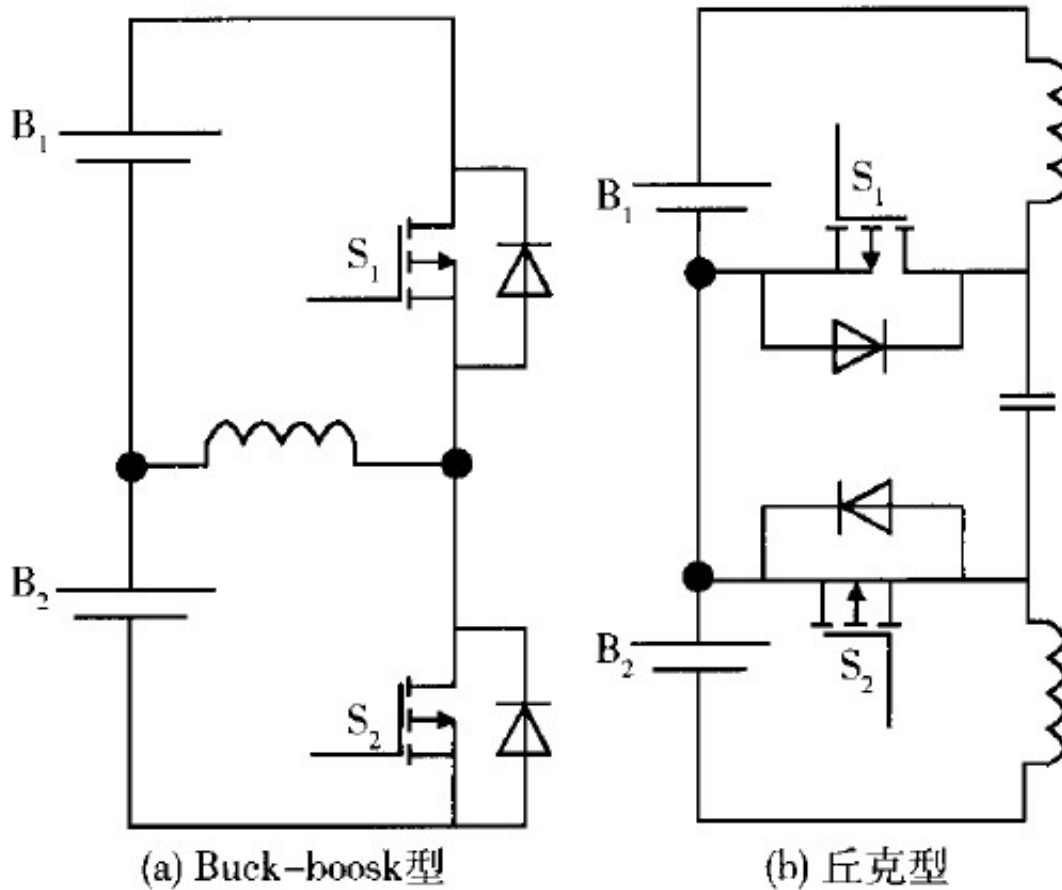


图 4 非隔离型均衡电路拓扑

(2) 隔离型拓扑

如图5所示为基本隔离型拓扑，每一个均衡电路都是一个带隔离变压器的buck—boost电路。优点是均衡效率高、开关器件上所承受的电压高低与串联级数多少无关，这种均衡结构比较适用于串联电池组数量较大的场合；其主要缺点是电路中有较多磁性元件，体积大，容易互感，变压器存在漏感，且难于将线圈保持完全一致。

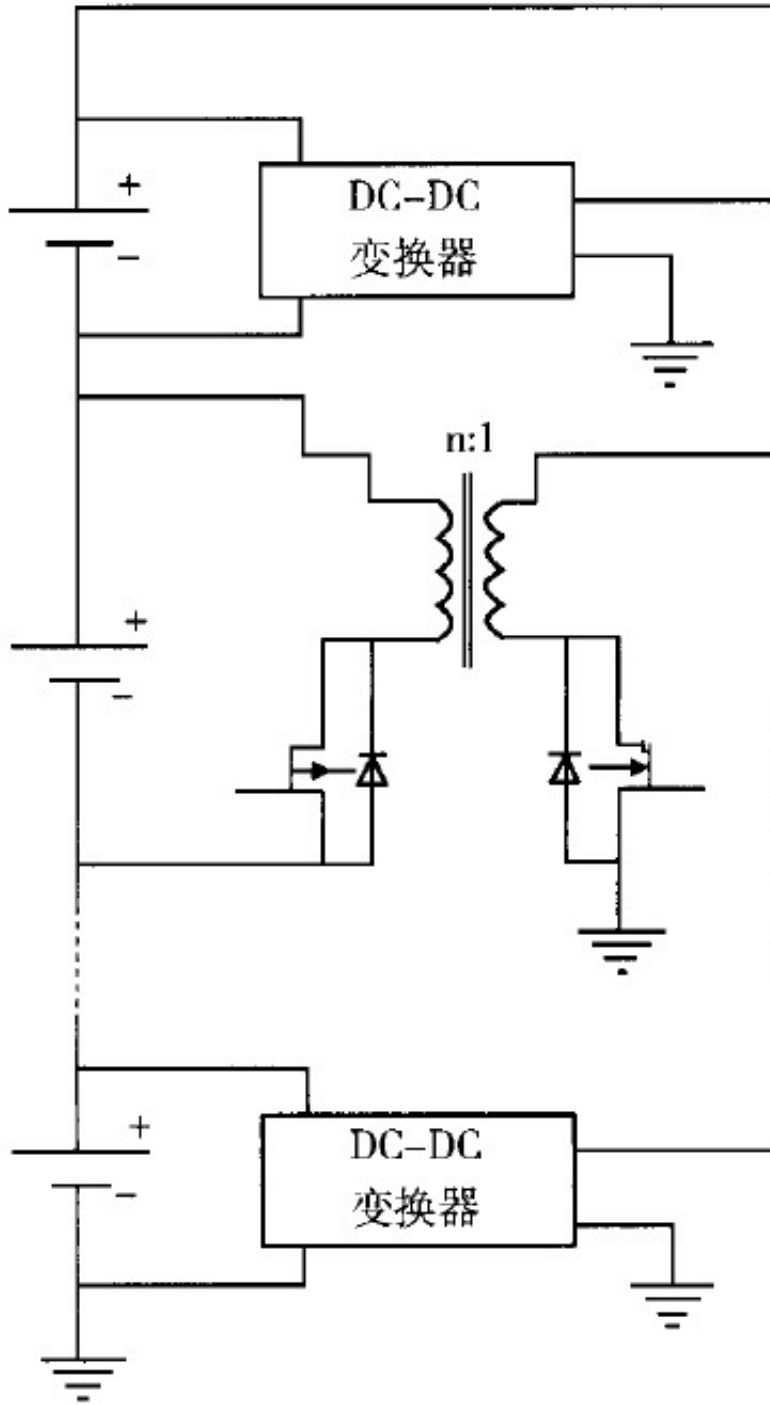


图 5 隔离型分布式 DC-DC

#### 4均衡控制策略

均衡控制策略在均衡目标上一般分三种：外电压、最大可用容量、实时SOC。

以外电压为均衡目标的控制策略是在充放电过程中实时测量电池单体外电压，对组内电压高的电池进行放电，电压低的电池进行充电，由此调整电池组电压趋于一致。这是目前应用最广泛的均衡法，其控制方式容易实现，对算法要求不高，缺点是用单一电压均衡，均衡的精度和效率难以保证，尤其是对于并联电池单体，无法应用该策略均衡。

以容量和实时SOC为均衡目标的均衡策略是指在充放电过程中控制各电池的剩余容量或SOC相等。由于容量和SOC

都是不能直接测量得到的电池参数，是需要通过可以测量的一次量(电压、电流、温度等)计算得到的二次量，计算的准确度受计算方法、电池模型的制约，电池老化，自放电，温度也是影响因素，很难确切掌握每节单体电池的具体容量和SOC。因此，目前这种控制策略应用较少。

### 5两个均衡方案介绍及均衡技术发展趋势分析

实际规模储能系统往往综合应用上述多种技术，本文列举两种方案，方案一是用于风光储储能电站的均衡方案之一，方案二是韩国KAIST大学研制的新型均衡电路。

#### 5.1电阻型放电DC-DC补电电路

电池能量管理单元BMU(Battery Management Unit)实时检测单体电压，根据均衡策略和电池组充放电状态，当判定某一电池单体SOC偏低需要补电时，DC-DC输出使能，当补电到目标值以后，补电均衡自动停止。

当判断某电池单体电压偏高需要放电时，打开对应的放电回路，图6中所示放电电阻( $R_1 \sim R_{12}$ )对该单体放电。当放电到目标值以后(或放电温度过高)时，放电均衡会自动停止。电池模块内部均衡原理框图如图6所示。

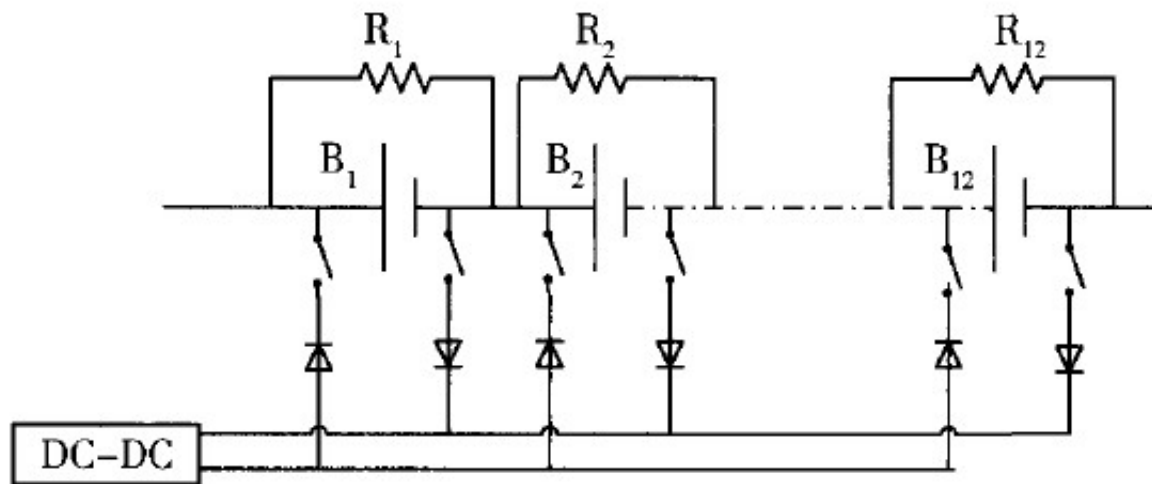


图6 储能电站均衡方案之一

#### 5.2基于buck-boost的新型均衡电路

图7为韩国KAIST大学研制的均衡电路，每个电池两端都分别装有二极管和开关管，构成均衡电流的单向通路，电池的一端与储能电感一侧的A点相连，另一端与电感另一侧的B点相连，为了减少开关器件，处于最两端的均衡支路只有一个开关管和一个二极管。

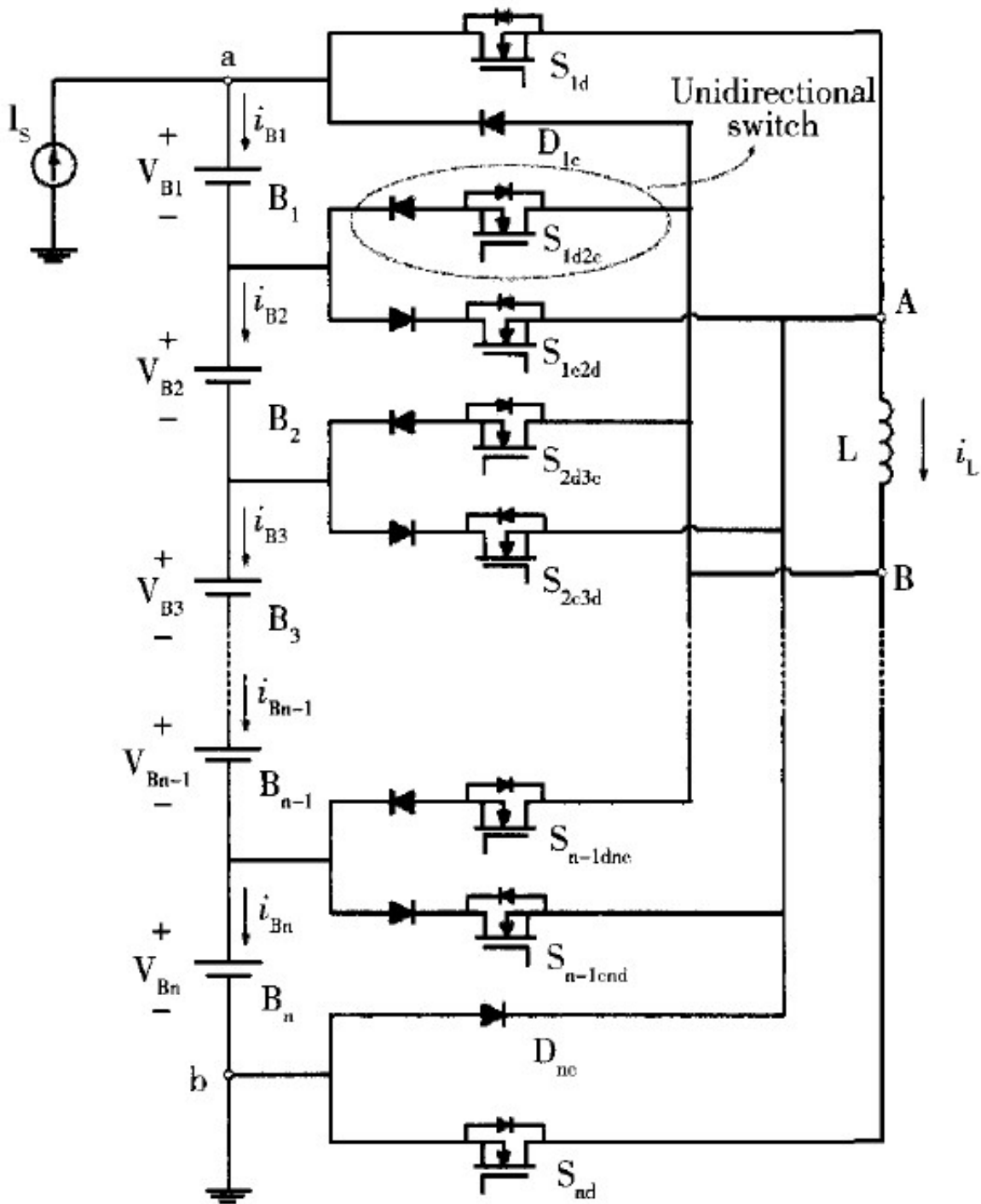


图7 基于 buck-boost 的新型均衡电路

均衡策略是通过检测电池单体工作电压，将电压高的电池电量转移到电压低的电池中，例如，若B1电压最高，B2电压最低，开关S1d和S1d2c开通，电感储能，B1电压达到预设的均衡电压后，S1d关闭，S2c3d开通，电感释放能量给B2。

该电路的优点是每一个开关可以同时是一个电池的放电回路和另一个电池的充电回路。如开关S1d2e不仅是电池B1的放电回路开关，也是电池B2的充电回路开关。原理类似buck-boost电路，但只使用一个储能电感，因此体积小，成本低。



### 5.3均衡技术发展趋势分析

分析上述两个方案，可以得出以下结论：

(1)方案一是以电池工作电压为均衡目标，利用集中式DC-DC变流器拓扑作为使用频率较高的补电电路，利用电阻耗能型均衡电路作为放电电路，这样补电电路中电流只需单向流动，减少了开关器件的数量和成本，控制策略中以补电为主，放电为辅，兼能满足均衡效率和成本的双重要求。

(2)方案二是开关电容法和分散式DC-DC变流器法的结合应用，避免了开关电容法开关器件多、均衡效率低的缺点的同时，减少了分散式DC-DC变流器法中的磁性元件的使用，减小了体积。

(3)分布式DC-DC变换器均衡电路基本可以做到无损，每个均衡电路结构相同且相互独立工作，调制灵活度高，易于模块化，在电池组中增加电池个数时，均衡模块具有易于扩展的优点。其中buck-boost变换均衡比单向均衡具有更大的灵活性，适用于各种工况，例如电动汽车，因此应用前景更为广阔。

(4)开关电容法是目前常用的拓扑结构，能量通过电容组进行快速传递，实现动、静态的精确均衡，而不需要任何额外匹配装置或高精度误差要求，不需要闭环控制策略，均衡充电过程自行结束。但是开关器件多，且当相邻蓄电池间电压差较小时，其达到均衡需要很长时间。

### 6结语

规模储能技术可以配合新能源发电实现平滑输出、削峰填谷等功能，有很好的应用前景，而可靠、经济的均衡技术是实现规模储能应用的重要技术保证。由于规模储能电站使用年限较长，电池单体数量庞大，一般没有复杂工况，对均衡速度要求不高，因此对均衡电路的主要要求是开关元件较少、结构简单、损耗低、成本低、可靠性高。

目前规模储能均衡技术的主流是根据实际系统设计需要，将基本拓扑变换或将几种基本拓扑综合应用，以电池工作电压一致作为均衡目标，通过平均值计算，达到均衡目的。未来规模储能均衡技术将向着开关元件较少，结构简单，高效可靠、易模块化、实用性强，控制策略精细的方向发展。(李娜，白恺，陈豪，刘平  
华北电力科学研究院有限责任公司，北京100045；牛虎  
国网新源张家口风光储示范电站有限公司，河北张家口075000)

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/57633.html>