

高效的双向主动平衡器可延长 电池运行时间

凌力尔特公司 Samuel Nork Steve Knoth

由串联的、高功率密度、高峰值功率锂聚合物或锂铁磷酸(LiFePO_4)电池组成的大型电池组被普遍用于全电动(EV或者BEV)、混合燃气/电动汽车(HEV和插电式混合动力汽车或PHEV)、储能系统(ESS)等各种应用中。据预测,电动汽车市场对大规模串联/并联电池组将有很强需求。PEV和EV销售在2012~2020年度的复合增长率(CAGR)将达到37.4%。对大容量电池的需求越来越强烈,而电池价格一直非常高,它是EV或PHEV价格最高的组件,能行驶几十公里范围的电池价格通常就要超过10 000美元。高成本可以通过使用低成本/翻新电池来减轻成本压力,但这类电池会有较大的容量不匹配问题,这会缩短可使用时间和在一次充电后的行驶距离。即使是成本较高、质量较好的电池也会老化,不断重复使用会导致电池失配。要提高具不匹配电池的电池组容量可以通过两种方式来实现:开始时采用较大的电池,但这样做非常不符合成本效益;或采用主动平衡,该新技术可恢复电池组的电池容量,正有快速上升势头。

所有的串联连接电池必需保持电荷平衡

当一个电池组中的每节电池具备相同的电荷状态(SoC)时,这些电池就是“平衡”的。SoC指的是个别电池在充电和放电状态下,相对于其最大容量的剩余容量。例如:一个剩余容量为5Ahr的10Ahr电池具有50%的SoC。所有的电池都必须保持在某个SoC范围之内以避免受损或寿命缩短。可容许的SoC最小值和最大值因应用而异。在最重视电池运行时间的应用中,所有电池都可以在20%的SoC最小值和100%的最大值(满充电状态)之间工作。而这就要求电池寿命最长的应用而言,可能将SoC范围限制在30%最小值和70%最大值之间。在电动型汽车和电网存储系统中,这些数值是典型的SoC限制,电动型汽车和电网存储系统使用非常大和非常昂贵的电池,更换费用极高。电池管理系统(BMS)的主要作用是,仔细监视电池组中的所有电池,确保每一节电池的充电或放电都不超出该应用充电状态限制的最小值和最大值。

在采用串联/并联电池阵列时,并联连接电池会相互自动平衡,这种假定一般来说是对的。也就是说,随着时间

推移,只要电池接线端子之间存在传导通路,那么在并联连接的电池之间,电荷状态就会自动平衡。串联连接电池的电荷状态会随时间变化而分化,这种假定也是对的。由于电池组各处温度变化率的不同,或者电池之间阻抗不同、自放电速率或加载之不同,SoC会逐步发生变化。尽管电池组的充电和放电流往往使电池之间的这些差异显得不那么重要,但是累积起来的失配会越来越大,除非对电池进行周期性的平衡。之所以要实现串联连接电池的电荷平衡,最基本的原因就是补偿各节电池SoC的逐步变化。通常,在一个各节电池具有严密匹配之容量的电池组中,运用被动或耗散电荷平衡方案足以使SoC重新达到平衡。

如图1A所示,无源平衡简单而且成本低廉。不过,无源平衡速度非常慢,在电池组内部产生不想要的热量,而平衡是通过降低所有电池的余留容量,以与电池组中SoC值最低的电池相匹配。由于另一个常见的问题“容量失配”,无源平衡还缺乏有效应对SoC误差的能力。随着老化,所有电池的容量都会减小,而且电池容量减小的速率往

往是不同的，原因与之前所述的类似。因为流进和流出所有串联电池的电池组电流是相等的，所以电池组的可用容量由电池组中容量最小的电池决定。只有采用有源平衡方法(如图1B和1C所示的那些方法)才能向电池组各处重新分配电荷，以及补偿由于不同电池之间的失配而导致容量的减小。

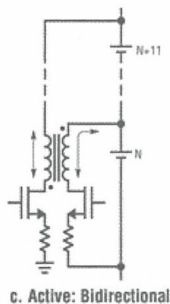
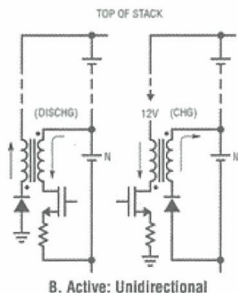
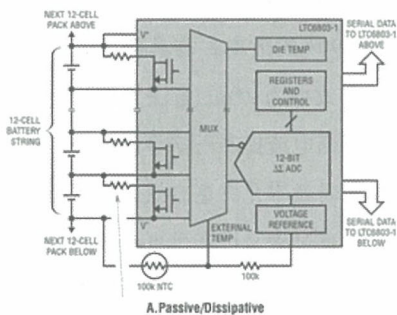


图1 典型的电池平衡拓扑

电池之间的失配能大幅度地缩短运行时间

电池之间无论是容量还是SoC之间的失配都可能严重缩短电池组的可用容量，除非这些电池是平衡的。要最大限度

地提高电池组的容量，就要求在电池组充电和电池组放电时电池都是平衡。

在图2所示的例子中，电池组由10节电池串联组成，每节电池的容量均为100A·hr(标称值)，容量最小的电池与容量最大的电池之间的容量误差为 $\pm 10\%$ ，对该电池组充电或放电，直至达到预定的SoC限制为止。如果SoC值限制在30%~70%之间，而且没有进行容量平衡，那么在一个完整的充电/放电周期之后，相对于这些电池的理论可用容量，可用电池组容量降低了25%。在电池组充电阶段，无源平衡从理论上可以让每节电池的SoC相同，但是在放电时，无法防止第10节电池在其他电池之前达到30%的SoC值。即使在电池组充电时采用无源平衡，在电池组放电时也会显著“丢失”容量(容量不可用)。只有有源平衡解决方案才能实现“容量恢复”，有源平衡解决方案在电池组放电时从SoC值较高的电池向SoC值较低的电池重新分配电荷。

No Active Balancing (30%-70% SoC Limits)

Cell #	Initial Capacity (A-hrs)	SoC (%)	Post-Discharge Capacity (A-hrs)	SoC (%)	Post-Fast Charge Capacity (A-hrs)	SoC (%)
1	110	100	47	43	77	70
2	100	100	37	37	67	67
3	100	100	37	37	67	67
4	100	100	37	37	67	67
5	100	100	37	37	67	67
6	100	100	37	37	67	67
7	100	100	37	37	67	67
8	100	100	37	37	67	67
9	100	100	37	37	67	67
10	90	100	27	30	57	63
Stack Capacity	1000		370		670	

Usable Stack Capacity: 670A-hrs - 370A-hrs = 300A-hrs
(75% of 400A-hrs theoretical max capacity \rightarrow 100A-hrs "lost")

图2 由于电池之间的失配而导致电池组容量损失的例子

图3说明了怎样采用“理想的”有源平衡，使由于电池之间的失配而“丢失”的容量得到100%的恢复。在稳定状态使用时，当电池组从70%SoC

的“满”再充电状态放电时，实际上必须从第1号电池(容量最高的电池)取出所存储的电荷，将其转移到第10号电池(容量最低的电池)，否则，第10号电池会在其他电池之前达到其30%的最低SoC点，而且电池组放电必须停止，以防止进一步缩短寿命。类似地，在充电阶段，电荷必须从第10号电池移走，并重新分配给第1号电池，否则第10号电池会首先达到其70%的SoC上限，而且充电周期必须停止。在电池组工作寿命期的某时点上，电池老化的差异将不可避免地导致电池之间的容量失配。只有有源平衡解决方案才能实现“容量恢复”，这种解决方案按照需要，从SoC值高的电池向SoC值低的电池重新分配电荷。要在电池组的寿命期内实现最大的电池组容量，就需要采用有源平衡解决方案，以高效率地给每节电池充电和放电，在电池组各处保持SoC平衡。

100% Efficient Balancing (30%-70% SoC Limits)

Cell #	Initial Capacity (A-hrs)	SoC (%)	Post-Discharge Capacity (A-hrs)	SoC (%)	Post-Fast Charge Capacity (A-hrs)	SoC (%)
1	110	100	33	30	77	70
2	100	100	30	30	70	70
3	100	100	30	30	70	70
4	100	100	30	30	70	70
5	100	100	30	30	70	70
6	100	100	30	30	70	70
7	100	100	30	30	70	70
8	100	100	30	30	70	70
9	100	100	30	30	70	70
10	90	100	27	30	63	70
Stack Capacity	1000		300		700	

Usable Stack Capacity: 700A-hrs - 300A-hrs = 400A-hrs
(100% of 400A-hrs theoretical max capacity)

图3 用理想有源平衡实现容量恢复

高效率双向平衡提供最强的容量恢复能力

LTC3300-1(见图4)是一个新产品，专门为满足高性能有源平衡的需求而设计。LTC3300-1是一款高效率、双向有源平衡控制IC，是高性能BMS的关键组件。每个IC都能同时平衡多达

6节串联连接的锂离子(Li-Ion)或磷酸铁锂(LiFePO₄)电池。

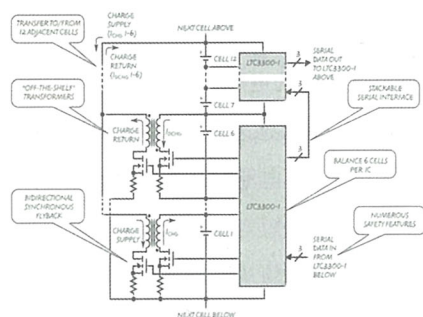


图4 LTC3300-1高效率双向多节电池有源平衡器

SoC平衡通过在一节选定的电池和一个由多达12节或更多节相邻电池构成的子电池组之间重新分配电荷来实现。平衡决策和平衡算法必须由单独的监视器件以及控制LTC3300-1的系统处理器来应对。电荷从一个指定电池重新分配给由12节或更多相邻电池组成的电池组，以给该电池放电。类似地，从12节或更多相邻电池组成的电池组将电荷转移给一个指定的电池，以给该电池充电。所有平衡器可能同时在任一方向上工作，以最大限度地缩短电池组的平衡时间。所有平衡控制命令都通过一个可叠置和噪声裕度很大的串行SPI接口提供给每个IC，对电池组的高度没有限制。

LTC3300中的每个平衡器都采用非隔离式、边界模式同步反激式电源级，以实现每一节电池的高效率充电和放电(见图5)。6个平衡器中的每一个都需要自己的变压器。每个变压器的“主”端跨接在接受平衡的电池上，“副”端跨接在12节或更多相邻电池上，包括接受平衡的电池。副端上电池的数量仅受外部组件击穿电压的限制。在相应的外

部开关和变压器调节范围内，电池的充电和放电电流可由外部检测电阻器设定为高达10A以上的值。

通过主端和副端组件进行的排序和 I_{PEAK}/I_{ZERO} 电流检测取决于平衡器是否启动以给电池充电或放电。高效率是通过同步工作以及组件的恰当选择实现的。每个平衡器都是通过BMS的系统处理器启动的，而且平衡器将保持启动状态，直至BMS发出停止的命令或指示检测到故障。

平衡器效率事关紧要

电池组面对的大敌之一是热量。高环境温度会快速缩短电池寿命并降低

其性能。不幸的是，在大电流电池系统中，平衡电流也必须很高，以延长运行时间或实现电池组的快速充电。如果平衡器的效率不高，就会在电池系统内部导致不想要的热量，而且这个问题必须通过减少能在给定时间运行的平衡器之数量来解决，或通过采用昂贵的降低热量方法来应对。如图6所示，LTC3300-1在充电和放电方向实现了>90%的效率，与具备相同平衡器功耗、效率为80%的解决方案相比，这允许平衡电流提高一倍多。此外，更高的平衡器效率允许更有效地重新分配电荷，这反过来又可产生更有效的容量恢复和更快速的充电。

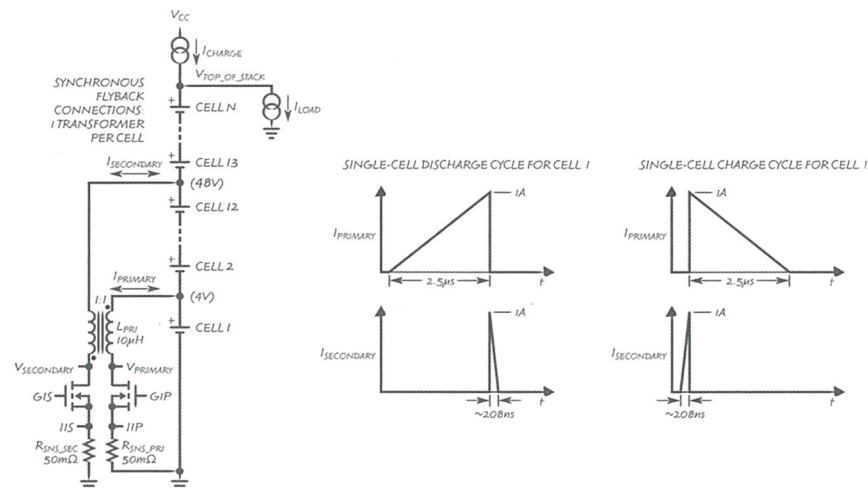


图5 双向反激式电源级的工作

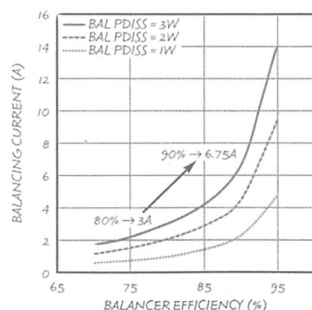
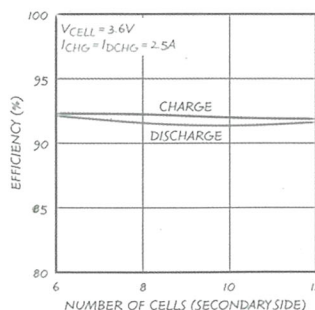


图6 LTC3300-1的电源级性能

局部电池负责完成大部分的平衡工作

整个电池组内的电荷转移是通过使副端接线交错(如图7所示)来实现的。以这种方式进行交错将允许电荷在任何一组电池(6节)与一组相邻电池之间来回转移。请注意,相邻的电池在电池组中既可以位于上方也可以位于下方。当优化某种平衡算法时这种灵活性是有帮助

的。关于任何交错式系统存在着一种常见的误解:将电荷从一个非常高电池组的顶端重新分配至底端其效率一定是极低的,这是因为将电荷从电池组顶端移至底端需要进行大量的转换。然而,如图7中给出的实例所示,大多数平衡只是通过在那些需要电荷平衡之电池的最靠近电池之间的电荷重新分配来完成。

含有10个或更多电池的副端电池组使得一个电荷不足的电池(若不补充电荷则其将限制整个电池组工作时间)简单地通过运行一个平衡器就能恢复其“丢失”容量的90%以上。因此,利用LT C3300的交错式拓扑将无须把电荷从电池组的顶端一路转移至底端,大多数的平衡工作都是由相邻的局部电池完成的。

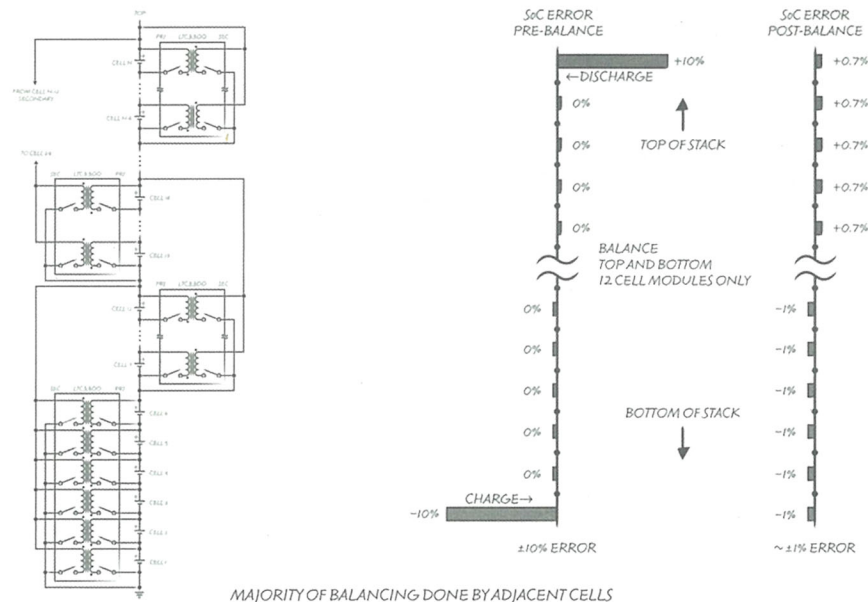


图7 交错式连接和电荷转移性能

安全是第一位的

除了提供卓越的电气性能, LTC3300双向有源平衡器还提供众多安全功能,以防止平衡时出现差错,并保持最高的可靠性。数据完整性检查(对所有传入和传出的数据、看门狗定时器和数据回读等进行CRC校验)防止平衡器响应无意间发出或错误的命令。可编程伏-秒钳位确保在平衡时的电流检测故障不会导致电流失控情况。逐节电池的过压和欠压检查以及副端过压检测可防止在平衡时突然发生的电池线束故障而导致损坏电路。