

大容量链式电池储能系统及其充放电均衡控制

金一丁, 宋 强, 刘文华

(清华大学 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为实现高母线电压、大容量的城网储能, 结合链式 DC/AC 变流器拓扑及多重化双向 DC/DC 变流技术, 提出一种适合于大容量、多储能模块的电池储能系统结构。该储能系统可以不通过升压变压器直接接入 10 kV 以上电压等级母线, 并可在较低开关频率下达到良好的输出谐波特性; 系统中每个串联单元的直流电压可在电池组端电压的基础上进一步提高, 并允许多组电池并联接入。针对三角接链式系统提出了三级电池充放电均衡策略。电磁暂态仿真实验的结果验证了相关控制策略的有效性。

关键词: 电池储能; 链式变流器; 多重化双向 DC/DC; 电池充放电均衡控制

中图分类号: TM 912

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0006-06

0 引言

本文结合多重化双向 DC/DC 变流技术^[1-2], 提出了一种适合于大容量电池储能^[3-4]的链式系统拓扑, 在保持串联单元数的情况下进一步提高装置容量。

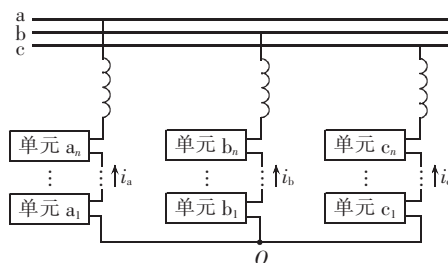
串联电池储能系统运行的关键问题在于系统充放电时各电池组间荷电状态(SOC)的平衡。如文献[5]中提出了以 SOC 值为反馈量的链式系统 SOC 均衡控制。针对本文提出的拓扑结构, 文中以三角接链式系统为例, 提出了链式储能系统的三级充放电均衡策略: 通过调节零序电流相量、变流器单元调制波幅值及 DC/DC 参考电流等方法在运行中维持各电池组的 SOC 值趋同, 优化储能容量。基于 EMTDC/PSCAD 软件的相关仿真证明了本文提出的主电路拓扑及控制系统的有效性。

1 基于链式结构的大容量电池储能

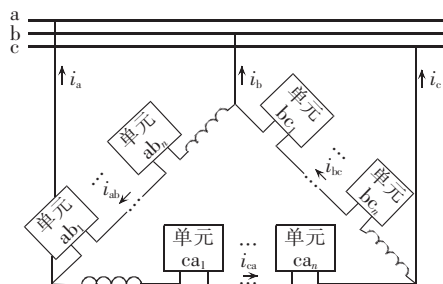
链式储能系统^[6-9]主电路结构如图 1 所示。装置每相由 n 个变流器单元串联而成, 通过滤波电抗直接与电网相连, 在省去升压变压器的同时还可利用多电平脉冲生成方式提高系统等效开关频率, 并通过模块冗余提升系统可靠性。

根据电网接入方式的不同, 可将链式系统分为星接与三角接 2 种, 见图 1。图中, i_a, i_b, i_c 为注入系统的相电流, i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} 为三角接线电流。

目前, 对于链式储能系统的研究多直接将电压型储能模块串联, 经电容滤波后置于单元直流侧。该方法在结构及控制上较为简单, 但应用在电池储能系统中则存在以下不足:



(a) 星接链式储能系统



(b) 三角接链式储能系统

图 1 链式储能系统主电路

Fig.1 Topology of cascaded energy storage system

a. 由于直流电压须高于交流输出电压幅值, 电池组的串联数取决于单元变流器的直流母线电压等级, 而过高的串联数将降低装置可靠性;

b. 为防止环流, 电池组之间不能直接并联, 储能系统容量受限于单组电池的最大充放电电流。

对此, 本文结合变压器升压型大容量电池储能系统^[10]中多储能模块共用直流母线的结构, 提出了一种单元变流器拓扑, 如图 2 所示。

图中, 每组电池通过单独的双向 DC/DC 变流器接入直流母线, Boost 升压作用降低了对单组电池的端电压要求; 同时, 每组 DC/DC 可独立调节电池电流, 避免了充放电电流不均, 也可以人为提供偏差以调节各电池组的荷电状态。电池管理系统 BMS (Battery Management System) 除监控电池运行状态外, 还负责向控制系统反馈各组电池的 SOC 值。双向

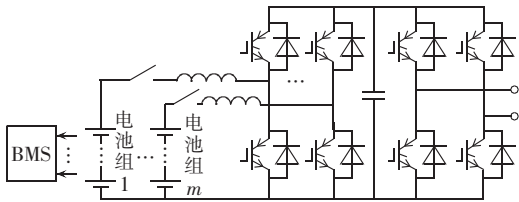


图 2 链式储能系统变流器单元结构

Fig.2 Converter module of cascaded energy storage system

DC/DC 变流器的引入在相同电压等级的条件下扩展了系统容量,为链式拓扑应用于大容量储能打下了基础。

2 链式电池储能系统的控制策略

针对本文提出的储能系统的特点,其控制系统除具有传统的系统级控制、装置级控制与开关脉冲控制^[11]之外,还包括变流器单元内直流母线电压稳定控制与电池充放电均衡控制 2 个重要部分。

以定功率控制为例,系统级控制策略如图 3 所示,其中, P_{ref} 、 Q_{ref} 为有功、无功参考值,在系统三相电压平衡时可开环计算出系统电流的 dq 坐标系下参考值 i_{dr} 、 i_{qr} ^[12], u_{ds} 为系统电压的 d 轴分量。同时,参考值与实测值 P 、 Q 间的误差通过积分器 K_E/s 累加,作为前馈量以消除跟踪误差。求得的 i_{dr} 、 i_{qr} 再经由坐标变换转化为三相电流参考值 i_{ar} 、 i_{br} 、 i_{cr} 送至系统内环电流控制器。

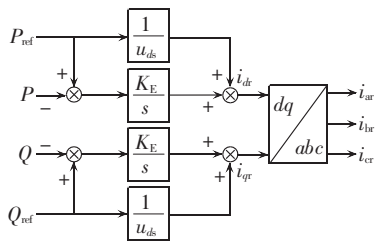


图 3 链式储能系统定功率控制器

Fig.3 Power controller of cascaded energy storage system

链式系统每一串联单元的直流母线上都并联 m 组 DC/DC,各组电池通过与直流母线之间的功率交换来维持母线电压稳定。DC/DC 的控制采用二阶状态反馈,具有稳定性强、参数适应性强、响应速度快等特点^[12],同时可以限制并合理分配各并联电池组的充放电电流。ab 相 i 单元第 j 组 DC/DC 的控制策略如图 4 所示,单元直流电压参考值 u_{dr} 与实测值 $u_{d,ab,i}$ 的误差经 PI 控制器校正,再经充放电均衡调整,作为该组 DC/DC 的电流内环参考值 $i_{ab,i(j)r}$ 。电池电流反馈值经平均化得 $\bar{i}_{ab,i(j)}$,内环误差由比例控制器 K_b 放大,根据此刻的充放电状态计算占空比 $D_{ab,i(j)}$,并通过三角波比较法生成相应开关管的脉冲。

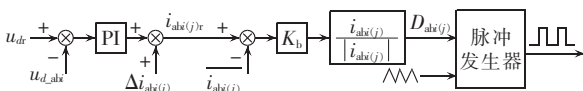


图 4 链式单元变流器并联 DC/DC 控制策略

Fig.4 Control scheme of parallel DC/DC converter

其中, $\Delta i_{ab,i(j)}$ 为单元内电池充放电均衡策略给出的电流偏置量,将作为链式系统充放电均衡策略的一部分在第 3 节中予以说明。

3 三角接链式储能系统充放电均衡策略

在串联型电池储能系统运行中,如何控制各组电池处于相同的 SOC,是保证系统运行于额定容量的基础。针对这个问题,本文基于三角接链式电池储能系统结构,提出了相应的电池充放电均衡策略。该策略分为相间均衡、串联单元间均衡与单元内均衡 3 个层次。

3.1 等效 SOC 值计算与均衡策略

链式系统的充放电均衡控制是一套将储能电池 SOC 值,以及各单元、各相的等效 SOC 值作为反馈量的闭环控制策略。这里首先定义储能电池 SOC 值的函数: $S_{ab,i(j)}$ 为 ab 相第 i 组串联变流器单元中第 j 个并联电池组的 SOC 值,其值由对应的 BMS 模块计算得到。串联单元的等效 SOC 值可由并联于直流母线上的各组电池 SOC 值平均得到,如 ab 相第 i 单元的等效 SOC 值可表示为

$$S_{ab,i} = \frac{1}{m} (S_{ab,i(1)} + S_{ab,i(2)} + \dots + S_{ab,i(m)}) \quad (1)$$

其中, $S_{ab,i}$ 为单元 i 等效 SOC 值, m 为并联于直流母线的电池组数。在此基础上,装置 ab 相等效 SOC 值可表示为

$$S_{ab} = \frac{1}{n} (S_{ab,1} + S_{ab,2} + \dots + S_{ab,n}) \quad (2)$$

其中, S_{ab} 为 ab 相等效 SOC 值, n 为 ab 相串联单元数量。bc、ca 两相的计算同 ab 相。

以 SOC 函数为反馈量,包含电池充放电均衡策略的链式储能系统控制如图 5 所示。

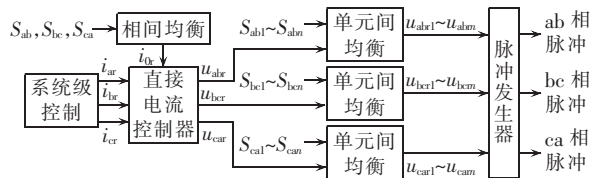


图 5 包含电池充放电均衡策略的控制系统示意图

Fig.5 Control system with battery charge/discharge balancing

其中,相间均衡利用各相等效 SOC 值计算三角接系统所需的零序电流参考值 i_{0r} ;直接电流控制器计算得到的系统输出线电压参考值 $u_{ab,r}$ 、 $u_{bc,r}$ 、 $u_{ca,r}$ 经由单元间均衡策略的波形调整,生成不同的调制波(如 ab 相各单元调制波分别为 $u_{ab,r1} \sim u_{ab,rn}$)送往各变流器单元。脉冲发生器采用载波移相技术^[13],生成的脉冲被送往相应开关管。单元内均衡策略作用于图 4 中的并联 DC/DC 控制器内。

3.2 链式系统相间均衡策略

链式系统根据不同的接入电网方式,具有不同的控制自由度。对于星接系统,图1(a)中 O 点电位

的选取,引入了可控的零序电压,可通过调节其幅值和相位来改变各相之间的功率分布;三角接系统虽然没有物理上的中性点,但具有可控的零序环流,通过调节零序电流相量,可以达到同样目的。

三角接系统电压、电流相量如图 6 所示。其中 $U_{sab} \setminus U_{sbc} \setminus U_{sca}$ 为系统线电压相量, $I_{ab} \setminus I_{bc} \setminus I_{ca}$ 为线电流相量。

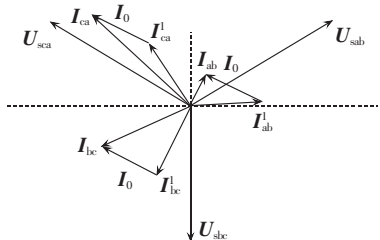


图 6 三角接系统电压、电流相量图

Fig.6 Voltage and current vectors of delta configuration

本文设计的控制系统内环采用直接电流控制器,在参数设置合理的情况下可以准确、快速地跟踪参考电流信号。假设系统电压三相平衡,则变流器输出三相正序线电压即可获得正序线电流 $I_{ab}^* \setminus I_{bc}^* \setminus I_{ca}^*$ 。此时若在参考电流中加入零序分量 I_0 ,则系统线电流可以视为正序电流与零序环流之和。由三相系统线电流与相电流关系可知,改变 I_0 并不影响输出的相电流。同时 ab 相输出功率 P_{ab} 可由下式得到:

$$P_{ab} = \text{Re}(U_{sab} \times I_{ab}^*) = \text{Re}(U_{sab} \times I_{ab}^* + U_{sab} \times I_0^*) \quad (3)$$

式(3)中 P_{ab} 可分解为正序电流 I_{ab}^* 产生的功率分量和环流 I_0 产生的功率分量。相比之下,各相正序电流产生的功率分量均等,为平衡功率分量;而 I_0 在三相中产生的功率分量互不相等,为不平衡功率分量。通过调整相量 I_0 的幅值和方向,可以在链式系统输出电流容许的范围内灵活调节不平衡功率大小,起到充放电平衡的作用。

相量 I_0 的计算方法如图 7 所示。

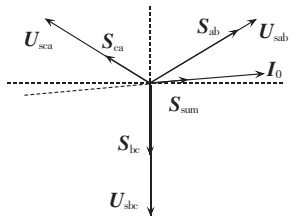


图 7 三角接链式系统零序电流控制

Fig.7 Zero sequence current control of system based on delta configuration

图中以函数值 $S_{ab} \setminus S_{bc} \setminus S_{ca}$ 为幅值,依据各线电压相位,构造出虚拟相量 $S_{ab} \setminus S_{bc} \setminus S_{ca}$ 。 S_{sum} 是 3 个虚拟相量之和。运行时控制 I_0 与 S_{sum} 方向相同,这样在放电时, SOC 值最大的一相具有最高的放电功率,而在充电时,该相有最小的充电功率。包含相间均衡控制的电流内环控制器如图 8 所示。

在零序电流参量计算模块中, I_0 的幅值由比例

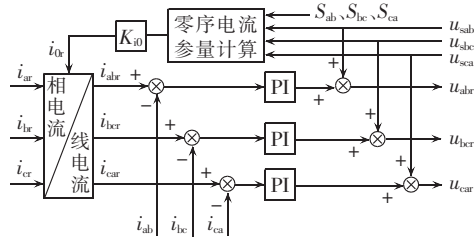


图 8 三角接链式系统直接电流控制器

Fig.8 Direct current controller of system based on delta configuration

控制器 K_0 调节,经限幅后与原相电流参考值相加,获得线电流参考值 $i_{abr} \setminus i_{bcr} \setminus i_{car}$ 。为准确、快速跟踪电流参考值,采用文献[14]中的瞬时电流分相控制,计算得到的电压参考值 $u_{abr} \setminus u_{bcr} \setminus u_{car}$ 被送至 PWM 控制器。 $u_{sab} \setminus u_{sbc} \setminus u_{sca}$ 为电网线电压。

3.3 每相单元间均衡策略

上述相间充放电均衡策略保证了系统各相等效 SOC 的平衡,而在每相系统中,则需要单元间均衡策略来协调各串联变流器的充放电。由于各单元流过相同的电流,因此,单元间均衡策略通过调整输出电压实现功率在单元之间的可控分配。

系统采用载波移相 PWM^[13] 调制,并引入 SOC 值的反馈。以 ab 相为例,带有单元间均衡策略的链式系统脉冲发生器如图 9 所示。各单元在原 ab 相参考电压 u_{abr} 的基础上分别增加了偏移量 $\Delta u_{ab1} \sim \Delta u_{abn}$,偏移量的相位与流过该相线电流 i_{ab} 的相位相同,图中 ω 为电网角频率, δ 为 i_{ab} 的初相角,由电流参考值计算得到;偏移量幅值则由各单元等效 SOC 值与 ab 相等效值的误差放大得到。校正后的调制波 $u_{ab1} \sim u_{abn}$ 与依次移相 $2\pi/n$ 的三角载波相比较,生成相应开关管脉冲。

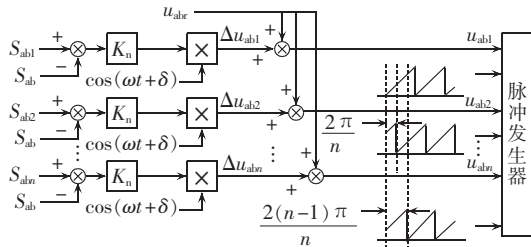


图 9 ab 相单元间控制策略

Fig.9 Balancing control between modules in phase ab

由于串联单元流过电流相同,交换功率的差异基本由电压偏移量造成,若忽略开关造成的谐波,则单元 i 输出的偏移功率 ΔP_{abi} 可由式(4)表示:

$$\Delta P_{abi} = i_{abm} K_{PWM} K_n (S_{abi} - S_{ab}) \cos^2(\omega t + \delta) \quad (4)$$

其中, i_{abm} 为 i_{ab} 幅值;脉宽调制简化为比例环节 K_{PWM} ; K_n 为单元间均衡控制系数。可以看出当 S_{abi} 高于各单元均值 S_{ab} ,则输出功率增大,加速单元放电或减缓单元充电,反之亦然。同时各单元的参考电压偏移满足式(5),因此单元间均衡策略不会影响系统其他环节的控制性能。

$$\sum_{i=1}^n \Delta u_{abi} = \sum_{i=1}^n K_n \left(S_{abi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{abi} \right) = 0 \quad (5)$$

式(5)在调制波不受限幅影响的条件下成立,反之一旦调制波被限幅,便会造成输出波形的畸变,影响到上层控制的效果。若要保证这一点,可以在运行时在线调节 K_n 或在设计时适当提高直流母线电压,令其满足式(6)的约束:

$$\frac{u_{abm}}{nu_d} < 1 - K_n \max \{ |S_{abi} - S_{ab}| \} \quad (6)$$

其中, u_{abm} 为正常运行时装置输出的最高电压的幅值; u_d 为单元直流母线电压; K_n 所在的乘积项表示单元间均衡控制施加给调制波的最大偏移量。单元间均衡的响应速度由 K_n 的大小控制,但同时要考虑到各组电池最大电流的限制。对链式拓扑而言,提高直流母线总电压可通过增加串联单元数和提高各单元母线电压来实现。

3.4 单元内充放电均衡策略

并联于单元直流母线上的各组双向 DC/DC 变流器通过控制电池的充放电功率来稳定母线电压,单元内均衡策略便是通过调节图 4 中电流内环参考值偏移量 $\Delta i_{abi(j)}$ 的大小来平衡并联电池组的 SOC 值。仍以 ab 相 i 单元为例,各并联电池组电流参考值偏移量可由式(7)计算:

$$\Delta i_{abi(j)} = K_{lr} (S_{abi(j)} - S_{abi}) \quad j=1,2,\dots,m \quad (7)$$

其中, $\Delta i_{abi(j)}$ 为第 j 组并联电池电流偏移量; K_{lr} 为单元内均衡策略采用的比例控制器系数; $S_{abi(j)}$ 为第 j 组电池 SOC 值; S_{abi} 为 m 组电池 SOC 的均值,即是该串联单元的等效 SOC 值。

对于 SOC 值高于均值的电池组,单元内均衡策略促使其加速放电或延缓充电,同时,各组电池的电流偏移量之和为零,保证了单元直流母线电压控制的效果不变。

4 仿真实验

为检验所设计链式储能系统拓扑及控制系统的有效性,基于 EMTDC/PSCAD 软件进行了仿真实验。测试系统为三相三角接链式储能装置,接入 500 V 电网,每相串联 3 组变流器,各单元直流母线上并联 2 组 DC/DC 模块,每个模块对应一组储能电池。

系统及控制器仿真系统参数如下:额定容量 P_N 为 300 kW;电池电动势为 259 V,内阻为 0.05 Ω ;每相串联滤波电感 L_f 为 1 mH;系统接入电阻 R_s 为 0.002 5 Ω ,电感 L_s 为 20 μ H;直流电容 C_d 为 1 mF;DC/DC 升压电感 L_b 为 5 mH;系统频率 f 为 50 Hz;单元逆变器开关频率 f_{s1} 为 1 000 Hz;DC/DC 开关频率 f_{s2} 为 5 000 Hz;单元直流电压参考值 u_{dr} 为 400 V;功率环积分器系数 K_E 为 0.005 kV·s;直接电流控制 PI 参数 K_{pi} 为 0.02 A⁻¹, K_{li} 为 0.2 A·s;DC/DC 电压环 PI 参数 K_{pl} 为 1 Ω^{-1} , K_{ld} 为 0.008 Ω ·s;DC/DC 电流环参数 K_b 为 0.1 A⁻¹;充放电均衡控制器参数 K_0 为 40 A, K_{lr} 为 200 A, K_n 为 1(说明:PI 控制器比例、积分系数

及有关系数有单位的原因是其输入量和输出量的量纲不同,彼此间的单位也不同。A⁻¹ 是指“1/安培”,A·s 是指“安培·秒”, Ω^{-1} 为“1/欧姆”, Ω ·s 为“欧姆·秒”。

稳态运行条件下的系统各状态量波形如图 10 所示。其中, $u_{d,ab1}$ 、 $u_{d,bc1}$ 、 $u_{d,ca1}$ 分别表示各相第 1 单元直流母线电压, $u_{d,ab2}$ 为 ab 相 2 单元直流母线电压; $i_{ab1(1)}$ 、 $i_{ab1(2)}$ 为 ab 相 1 单元对应的 2 组电池电流,而 $i_{ab2(1)}$ 为 ab 相 2 单元第 1 组电池电流。

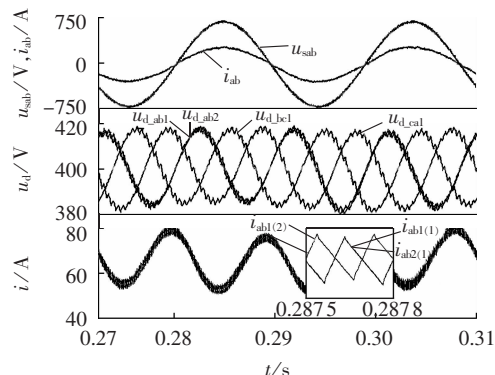


图 10 链式储能系统稳态放电波形

Fig.10 Static discharge waveform of cascaded energy storage system

储能系统以交流侧单位功率因数额定容量放电,由于链式系统三相直流侧分离,线电流会在单元直流电压上产生 2 倍电网频率的功率波动。若不考虑 DC/DC 响应,波动幅值可由式(8)近似估计^[15]:

$$\tilde{u}_{dm} = \frac{u_s i_s}{2n\omega C_d u_d} \approx 13.3(\text{V}) \quad (8)$$

其中, $\tilde{u}_{dm}$ 为电压波动幅值, u_s 、 i_s 为该相系统电压及流过电流的有效值, n 为串联单元数。DC/DC 的响应延迟使实际电压波动略大于估计值,在 15 V 左右;反之, $\tilde{u}_{dm}$ 也会在电池电流中引起二倍频分量,其幅值可由 $K_{pl} \tilde{u}_{dm}$ 估计,其中 K_{pl} 为 DC/DC 电压环 PI 控制器的比例系数。在电池电流的波形放大处, $i_{ab1(1)}$ 与 $i_{ab2(1)}$ 的幅值、纹波相位基本相同,而 $i_{ab1(1)}$ 、 $i_{ab1(2)}$ 的纹波相位互差 180°,多重化技术使 2 组电池的电流轮流注入直流母线,可减小电压纹波,改善控制性能。

为检验电池充放电均衡策略的有效性,令储能系统以 200 kW 充电,各组储能电池 SOC 初值为 0.3,只有 ab 相 1 单元由于刚投入,2 组电池 SOC 值分别为 0.8 和 0.6, SOC 不平衡时系统充电过程如图 11 所示。

a. ab 相与另两相等效 SOC 值相差 0.13,相间均衡策略产生 38 A 零序电流 i_0 ,其方向与 u_{sab} 相同,使得 i_{ab} 减小, i_{bc} 、 i_{ca} 增加,如上图虚线所示;

b. 在单元间均衡策略的作用下,ab 相 1 单元输出电压减小,2、3 单元输出电压升高,使 1 单元充电功率进一步减小;

c. 单元内均衡策略使 SOC 值较高的电池承担更小的充电电流,在 2 组电池相差较大的情况下较高者甚至运行于放电状态,如图中 $i_{ab1(1)}$ 。

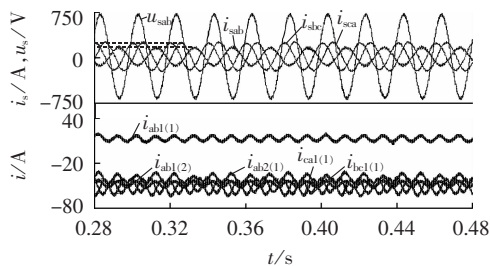


图 11 不平衡 SOC 下储能电池充电情况

Fig.11 Battery charging under unbalanced SOC

图 11 中,ab 相 1 单元 2 组电池电流 $i_{ab1(1)}$ 、 $i_{ab1(2)}$ 分别在 12 A(放电)和 48 A(充电)左右;同相 2 单元单组电池充电电流在 40 A 左右,大于 1 单元的均值 18 A;而 ab 相电池平均提供 32.67 A 充电电流,也小于另两相每组 50 A 的均值,与分析相符。

电池的各级充放电策略不但在充电或放电状态下发挥作用,在储能系统零功率输出的热备用状态下也可以适当平衡各组电池的 SOC。反之,SOC 的均衡控制必须要求某一组或几组电池运行在较高电流下,因此均衡的速度受到电池最大电流的限制。装置越是接近额定功率运行,受限幅影响 SOC 均衡控制的效果越弱,因此不能保证在一个充/放电过程中平衡任意的 SOC 分布。这一过程可能需要在多次充放电中完成。图 12 模拟了这一过程。

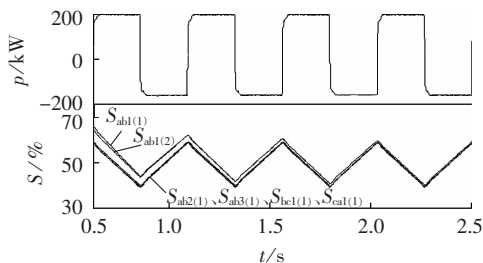


图 12 充放电条件下的 SOC 平衡控制

Fig.12 SOC balancing in charge and discharge periods

图 12 中系统从 0.5 s 时刻,每隔 0.25 s 在 200 kW 充电与 200 kW 放电状态之间切换。各组电池 SOC 初值亦为 30%,ab 相 1 单元 2 组电池 SOC 初值设为 45% 与 35%。为缩短仿真时间,单组电池容量设为 60 A·s。从图中可以看出,充放电平衡策略不影响储能装置良好的功率响应,同时充放电均衡策略在充放电切换的过程中可达到连续调节。另一方面,假设 0.5 s 时刻 $S_{ab1(1)}$ 达到电池充电结束的阈值,则装置停止充电,此时其他组储能电池并没得到充分利用,这也是串联型储能装置固有的问题,这一问题在 3 个充放电周期后因 SOC 重新均等而得到解决。

4 结论

为实现高电压、大容量的城网储能,本文基于链式系统拓扑,结合多重化双向 DC/DC 变流技术,提出了一类适合于大容量、多储能模块的电池储能系统。

并基于三角接法设计了一套链式电池储能系统,以及适应于该系统的电池充放电控制与三级均衡策略,使装置在充电、放电的过程中,各组储能电池的荷电状态自动趋于平衡,也使得链式系统的冗余单元得以引入,以提高装置运行的可靠性。而另一方面,充放电均衡的速度受电池及变流器最大电流的限制,在 SOC 值差异较大的情况下可能需要多个充放电周期实现,其间储能系统的总容量受限。文中设计的链式储能系统拓扑不但适用于电池储能,对超级电容等电压源储能元件同样适用。

参考文献:

- [1] 金一丁,宋强,刘文华. 电池储能系统的非线性控制器[J]. 电力系统自动化,2009,33(7):75-80.
JIN Yiding, SONG Qiang, LIU Wenhua. Nonlinear controller for battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 75-80.
- [2] 金一丁,宋强,陈晋辉,等. 大容量电池储能电网接入系统[J]. 中国电力,2010,43(2):16-20.
JIN Yiding, SONG Qiang, CHEN Jinhui, et al. Power conversion system of large scaled battery energy storage[J]. Electric Power, 2010, 43(2): 16-20.
- [3] ABB Switzerland Ltd. ABB advanced power electronics; world's largest battery energy storage system[EB/OL]. [2009-10-09]. <http://www.abb.com/powerelectronics>.
- [4] ABB Switzerland Ltd. ABB advanced power electronics; little barford power station, regenesis-plant, United Kingdom[EB/OL]. [2009-10-09]. <http://www.abb.com/powerelectronics>.
- [5] MAHARJAN L, INOUE S, AKAGI H, et al. A transformerless battery energy storage system based on a multilevel cascaded PWM converter[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 4798-4804.
- [6] MAHARJAN L, INOUE S, AKAGI H. A transformerless energy storage system based on a cascaded multilevel PWM converter with star configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1621-1630.
- [7] QIAN Chang, CROW M L. A multi-processor control system architecture for a cascaded statcom with energy storage[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. California, USA: [s.n.], 2004: 1757-1763.
- [8] AL-HADIDI H K, GOLE A M, JACOBSON D A. A novel configuration for a cascaded inverter-based dynamic voltage restorer with reduced energy storage requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 881-888.
- [9] TOLBERT L M, PENG Fangzheng. Multilevel converters as a utility interface for renewable energy systems[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, USA: IEEE, 2000: 1271-1274.
- [10] 许海平. 大功率双向 DC/DC 变换器拓扑结构及其分析理论研究[D]. 北京:中国科学院电工研究所, 2008.
XU Haiping. Research on topology and analysis theory of high power bidirectional DC/DC converters[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [11] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006: 211-218.
- [12] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 18-19.

- [13] 袁志昌,宋强,刘文华. 载波移相 SPWM 开关频率的选取[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):37-41.
YUAN Zhichang, SONG Qiang, LIU Wenhua. Selection of phase-shift SPWM switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8):37-41.
- [14] 许树楷,宋强,朱永强,等. 用于不平衡补偿的变压器隔离型链式 D-STATCOM 的研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(9):137-143.
XU Shukai, SONG Qiang, ZHU Yongqiang, et al. Research on the transformer-isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9):137-143.
- [15] MARCHESONI M. DC-link filter capacitors reduction in multi-level modular H-bridge converter structures[C]//Proceedings of

the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. L' Aquila, Italy: IEEE, 2002:902-907.

(编辑: 柏英武)

作者简介:

金一丁(1984-),男,辽宁沈阳人,博士研究生,研究方向为柔性交流输配电系统(E-mail:jinyd06@mails.tsinghua.edu.cn);

宋强(1975-),男,吉林长春人,副研究员,博士,研究方向为柔性交流输配电系统及高频变换电源;

刘文华(1968-),男,湖南长沙人,研究员,博士,研究方向为柔性交流输配电系统及高频变换电源。

Large scaled cascaded battery energy storage system with charge/discharge balancing

JIN Yiding, SONG Qiang, LIU Wenhua

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to connect large scaled energy storage to high voltage bus in urban distribution network, a battery energy storage system topology for the large scaled and multi-modular systems is proposed, which combines the cascaded converter topology with the interleaved bi-directional DC/DC conversion technology. The designed system can directly connect to 10 kV bus and above without transformer and achieve better output harmonics performance under lower switching frequency. The DC voltage of each serial module can be boosted based on the battery output voltage and the parallel connection of battery groups is allowed. A simulation system based on delta configuration is built with three-level charge/discharge balancing control. The control effectiveness is verified by EMTDC simulative results.

Key words: battery energy storage; cascaded converters; interleaved bi-directional DC/DC; battery charge/discharge balancing