级联双极型大容量电池储能系统及其控制策略

徐云飞,肖湘宁,孙雅旻,龙云波,徐永海 (华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:针对多储能单元级联的高电压、大容量应用场合,提出一种级联双级型电池储能系统。该系统由AC/ DC与DC/DC两级变换器构成,且均采用模块化多电平级联结构,具有结构紧凑、可靠性高、能量控制简单等 优点。建立该系统的数学模型并分析其工作原理及约束条件,设计了多电池组荷电状态(SOC)均衡策略, 有效解决了电池过充或过放的问题;针对储能系统在不对称运行条件下直流电流波动过大的问题,提出一种 直流波动抑制的前馈控制策略。最后,基于 RTDS 对该系统及控制策略进行数字-物理闭环仿真,验证了系统结 构和控制策略的有效性。

0 引言

随着风电、光伏发电等新能源的大规模接入,其 功率的随机性以及间歇性给电网的安全稳定运行带 来了新的挑战[1-3]。另外,基于分布式电源的微电网 系统研究日益成熟,孤网下的供电可靠性以及经济 效益亦成为制约其发展的重要因素。储能系统是解 决上述问题的关键技术之一。规模化分布式储能系 统的配置可为每一个用户提供更为优质的新能源接 入条件,提高分布式电源的利用率,但其综合成本较 高,且难以实现协调控制,因此储能为电网提供功 率支撑的作用有限。大容量集中式的储能系统不仅 可以平抑新能源大规模接入时的功率波动、辅助解 决低电压穿越问题,还可以改善微电网电能质量、提 高供电可靠性以及经济效益,当孤岛运行时,可为整 个微电网提供稳定的电压、频率支撑[4-7]。因此,大 容量储能系统在电网未来的发展中占据了重要的 地位。电池储能系统 BESS(Battery Energy Storage System)能量密度大、技术成熟且成本较低,可以通 过大量电池组的级联提高容量,其控制的灵活性较高, 更加适合大功率、大容量的应用环境[8-10]。

通常储能系统可通过特定的级联或串联形式接 于中、高压电力系统以提升容量,现有的级联式大容 量储能系统结构多采用 H 桥结构以及基于模块化 多电平变换器 MMC(Modular Multilevel Converter) 结构,其中储能单元直接或间接与储能换流器中的各 功率单元相连,这类结构中储能单元的输出功率受到 级联换流器内部交换功率的影响,储能部分能量均 衡控制较为复杂,并且需要同等数量的平波电感平抑 功率单元的直流纹波^[9-15],系统损耗较大。因此,本 文提出一种基于 MMC 结构的级联双极型 BESS,该 系统可直挂于中、高压母线处,且储能部分与 MMC 独立,在系统对称时可实现 MMC 与储能单元的功率 解耦。本文通过分析该系统原理建立了数学模型, 从结构及内部特性两方面与现有的高压大容量储能 系统进行对比,提出储能单元功率控制及 SOC 均衡 控制策略,并提出不对称工况下的直流波动抑制策 略,最后利用 RTDS 进行数字-物理闭环仿真实验, 以验证系统结构及算法的正确性。

1 基于 MMC 结构的级联双极型 BESS

1.1 拓扑结构

文献[10]提出了一种中高压 BESS 结构,该储能 系统由 H 桥结构的功率单元级联而成,其中电池组 直接并联于每个功率单元的直流端。该系统结构简 单,可扩展性强,且可以直挂于中、高压母线处。然而, 该结构各级联模块中的电池组可能分别处于充电或 者放电状态,导致其端电压差异较大,且实现电池组 荷电状态 SOC(State Of Charge)均衡较为困难,级联 储能变换器电流中包含较大纹波电流[11-12]。上述情 况均会影响整体储能系统的工作性能,降低储能单 元的使用寿命,严重时将危害系统安全。而且,由于 电池直接并联于各相级联子模块的直流母线上,当 某个电池组故障时需要直接旁路该级联 H 桥功率单 元,导致系统运行在不对称状态。文献[13-14]提出 了一种可扩展式 BESS, 电池组经过带高频隔离的 DC/DC 换流器连接于各全控桥的直流母线上,经连 接电抗与交流母线相连。此结构可更灵活地控制电 池组的充放电过程,且与交流系统间存在电磁隔离, 使系统运行更加安全可靠。然而,由于此结构需要

03

收稿日期:2015-06-29;修回日期:2016-04-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A113)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA-05A113)

大量的全控器件以及磁性元器件,因此不适用于级 联数较多的情况。文献[15]提出了基于 MMC 的储 能系统,该系统 MMC 子模块采用 AC/DC/DC 的双极 形式,储能单元通过 DC/DC 变换器并联于各子模块 直流电容两端。该系统不仅适用于高压大容量场合, 且系统结构高度模块化,各储能单元相对独立,便于 控制。基于储能系统的双极型结构,本文提出一种 级联双极型大容量储能系统,其结构如图 1 所示。





不同于文献[15],该系统将储能单元整体从 MMC 中独立出来,利用经典 MMC 及 MMC 直流桥臂构成 级联双极型结构。MMC 直流桥臂由半桥子模块与 直流阻抗构成,其中储能单元替换了半桥子模块中 的电容。本文提出的级联双极型 BESS 具有高度模 块化的优点,因此适用于高压大容量场合,且与现有 级联式大容量储能系统相比结构更为紧凑,储能单 元可进行灵活的独立控制,更容易实现各储能单元间 的能量均衡控制。

1.2 工作原理

由图 1 可知,本文提出的 BESS 可分为两部分,即 交流 MMC 部分与 MMC 直流桥臂。交流 MMC 部分 通过调节逆变电压实现系统四象限运行;MMC 直流 桥臂工作在 DC/DC 状态对储能单元进行能量控制。

MMC 直流桥臂拓扑结构如图 2(a)所示,其中 L_d 为直流侧滤波电感。本文采用载波移相 PWM 策略^[16] 控制 M 组全控器件(M 为直流桥臂子模块数),图 2 (b)中以 M=3 为例说明了载波移相调制算法下的 MMC 直流桥臂 PWM 调制机理。MMC 直流桥臂工 作原理如下,假设其工作在 Buck 模式下且电流连续, 各子模块占空比为 D,电池组电压均为 u_b,令:

$$u_1 = M u_{\rm b} \tag{1}$$



图 2 MMC 直流桥臂结构及调制机理 Fig.2 Structure of MMC DC bridge and its modulation principle

则有:

 $u_{de}=u_1D=MDu_b$ (2) 电路工作在高频状态下,忽略电感电阻,电感电

电函工作在高频状态下,忽哈电感电阻,电感电 压可近似表达为:

$$u_L = L_{\rm d} \Delta I_L / \Delta t \tag{3}$$

其中, ΔI_L 为电感电流波动分量。由图2可知,当各 子模块占空比D相同时,电感电压变化幅值为 u_b ,且 变化频率为M倍的子模块开关频率 $f_.$ 则有:

$$\Delta I_{L} = \frac{\left[(Fu_{\rm b} + u_{\rm b}) - (Fu_{\rm b} + Du_{\rm b}) \right] D}{2L_{\rm d} M f_{\rm s}} = \frac{u_{\rm b} (1 - D) D}{2L_{\rm d} M f_{\rm s}} = \frac{u_{\rm 1} (1 - D) D}{2L_{\rm d} M^{2} f_{\rm s}}$$
(4)

其中,F=floor(MD),floor(x)为向下取整函数。

同理,根据式(3)可推导出文献[15]中各子模块 滤波电感电流纹波为:

$$\Delta I_L' = \frac{u_{\rm sm}(1-D)D}{Lf_{\rm s}} \tag{5}$$

其中, u_{sm}为 MMC 子模块电容电压; L 为文献[15]中 子模块滤波电感。

综上所述,相比较于文献[15]中级联式储能结构而言,本文提出的结构主要优势可以总结为2点:

首先,在一定的输出电流纹波下,本文提出的储能系统中储能单元级联数 M 与其滤波电感值 L_d 成反比, 对比式(4)、式(5)可知,当设计 2 种结构中储能系统 滤波电感电流纹波相等时,即 $\Delta I'_L = \Delta I_L$,则有 $L_d/L = u_b/(2u_{sm}M)$,可以看出本文提出的储能系统所需的滤 波电感值更小且使用数量也大幅减少;其次,随着级 联数的增加,接口电压不断升高,但直流桥臂中电感 两端的电压保持为一个子模块电压,且等效开关频率 为子模块开关频率的 M 倍,因此可以有效降低电感 纹波电流,从而减小系统损耗。因此本文提出的基 于 MMC 的级联双极型 BESS 结构更为紧凑,尤其适 用于多储能单元级联的场合。

1.3 约束条件

由于 BESS 中 MMC 直流桥臂整体工作在 DC/ DC 模式下,由式(2)可知,MMC 直流母线电压 u_{de} 须 小于电池组电压之和 u₁。在运行时,由于各电池组 SOC 不同或者存在个别电池组故障的情况,直流桥 臂中某些子模块不能处于正常充、放电状态,因此在 设计时需考虑一定的裕量,则有:

$$u_{\rm dc} < (M - P)u_{\rm bmin} \tag{6}$$

其中,M为直流桥臂子模块数;P为冗余子模块数量; ubmin 为子模块电池组深度放电时的电池组端电压。同时,MMC公共直流母线侧电压应可以满足装置在额 定容量下的四象限运行,若忽略桥臂电阻,则有:

$$u_{\rm dc} > \frac{(1+X)u_{\rm pcc}}{\mu m} \tag{7}$$

其中, X 为 MMC 等效连接电抗标幺值; μ 为 MMC 直 流电压利用率; u_{pec} 为系统相电压幅值; m 为 MMC 最 大调制比。结合式(6)、(7)可以得到 MMC 直流公共 母线电压 u_2 的约束范围, 进而约束 MMC 直流桥臂 中子模块数 M, 以及每个子模块应串联的电池组数。

2 电网对称下的控制策略

根据上文对 MMC 直流桥臂工作原理的分析,并 结合 MMC 交流侧等效电路,可得到级联双极型 BESS 的等效电路如图 3 所示。图中, u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为系统电 压; u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 为 MMC 等效输出电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为 MMC 输出电流; u_{pa} 、 u_{pb} 、 u_{pc} 和 u_{na} 、 u_{nb} 、 u_{nc} 分别为 MMC 上、



图 3 级联双极型 BESS 等效电路 Fig.3 Equivalent circuit of cascaded bipolar BESS

下桥臂各相输出电压; u_{dc} 为 MMC 直流电压; u_{2} 为 MMC 直流桥臂输出电压; L_{seq} , L_{d} ,R分别为交流 MMC 等效电感、MMC 直流桥臂滤波电感及电阻。

由于储能系统中交流 MMC 与 MMC 直流桥臂 相对独立,且当系统对称时,MMC 直流桥臂电流中 不包含环流分量。因此,储能系统可实现交流 MMC 与 MMC 直流桥臂两部分的独立控制。

2.1 交流 MMC 控制策略

由图 3 可知,交流侧 MMC 输出关系可表示为:

$$u_{cx} = \frac{1}{2} (u_{nx} - u_{px}) = u_{sx} - L_{seq} \frac{di_x}{dt}$$
(8)

其中, x 代表 $a, b, c \equiv d; L_{seq}$ 为 MMC 等效连系电抗 电感值^[17], $L_{seq}=0.5L_s, L_s$ 为 MMC 桥臂电抗电感值。通 过行旋转变换, 可得 dq 旋转坐标下的交流 MMC 输 出关系为(忽略序分量^[19]):

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = L_{seq} \begin{bmatrix} -s & -\omega \\ \omega & -s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{sd} \\ \dot{i}_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix}$$
(9)

其中,*i_{sd}*和*i_{sq}、u_{cd}*和*u_{cq}、u_{sd}*和*u_{sq}*分别为交流 MMC 电流、等效输出电压以及系统电压在*dq*旋转坐标系下的瞬时值。采用基于*dq*旋转坐标下的双闭环算法 对交流 MMC 进行控制,包括电压外环及电流内环控制^[16],其中,*d*轴电流参考值为 MMC 公共直流母线 电压的调节量,以维持储能系统公共直流母线电压 稳定,*q*轴电流参考值为交流 MMC 无功功率输出基 准值。

2.2 MMC 直流桥臂控制策略

由图 2 可知, MMC 直流桥臂中各子模块流经电流均为 i_{dc} , 且交流 MMC 电压外环控制下直流母线电压 u_{dc} 可视为恒定值,因此调节直流桥臂输出电压 u_2 即可控制输出电流,结合图 3 中级联双极型 BESS 等效电路可知, MMC 直流桥臂系统传递函数 $G_{s}(s)$ 可表示为:

$$G_{\rm S}(s) = \frac{1}{sL_{\rm d} + R} \tag{10}$$

MMC 直流桥臂的控制环节及电压调制部分的非 线性和延迟环节可以用小时间常数惯性函数 G_D(s) 表示,即:

$$G_{\rm D}(s) = \frac{1}{1 + sT_{\rm d}} \tag{11}$$

其中,*T*_d为惯性时间常数。与此同时,由于电池组内 部参数差异以及外部环境的影响,MMC 直流桥臂中 各电池在充、放电过程中都会出现状态不均衡的现 象^[18]。这种不均衡现象会使得一些电池过充或过放, 以至于影响储能设备的正常运行及电池组的使用寿 命。通常利用 SOC 衡量电池组充放电状态,MMC 直 流桥臂中第*j*(*j*=1,2,3,…,*M*)个子模块中电池组的 SOC 可表示为:

$$S_{j} = \frac{Q_{j} + \int_{0}^{t} i_{dc}(t) dt}{Q_{T_{a}j}}$$
(12)

其中, Q_j 和 Q_{T_j} 分别为第j个电池组的初始电量和 额定电量。

通过上述分析可知, MMC 直流桥臂部分控制策 略中应包含两部分:直流电流控制和 SOC 均衡控制, 控制框图如图 4 所示。



图 4 MMC 直流桥臂控制策略 Fig.4 Control strategy of MMC DC bridge

直流电流控制为级联双极型 BESS 中储能电池 与系统有功功率交换的核心控制策略,指令值由上 层控制系统根据储能系统需要吸收或释放的有功 功率指令计算得来,采用调节器 G_{R_de}(s)对 MMC 直 流桥臂电流偏差进行控制,其偏差量作为直流桥臂 各子模块输出电压调制波的一部分。SOC 均衡控制 则是通过调节 MMC 直流桥臂中各电池组的投入时 间来实现的,其基准值 S_{avg} 为各电池组 SOC 平均值, 采用调节器 G_{R_sec}(s)对各模块 SOC 偏差进行控制, 其偏差量作为 MMC 直流桥臂各子模块输出电压调制 波的另一部分。调节器 G_{R de}(s)、G_{R sec}(s)可表示为:

$$G_{R_{-dc}}(s) = \frac{K_{L_{-dc}} + sK_{P_{-dc}}}{s}$$

$$G_{R_{-soc}}(s) = \frac{K_{L_{-soc}} + sK_{P_{-soc}}}{s}$$
(13)

根据图 4 可得 MMC 直流桥臂的开环传递函数, 根据幅值最优原理选取各调节器参数,可得:

$$\begin{cases} K_{P_{-dc}} = \frac{R}{L_{d}}, \ K_{I_{-dc}} = \frac{T_{d}}{R} \\ K_{P_{-soc}} = \frac{2R^{2}Q_{T_{-j}}}{T_{d} + 2L_{d}}, \ K_{I_{-soc}} = 0 \end{cases}$$
(14)

3 不对称补偿策略

当电网对称且储能系统输出正序电流时,由于 交流 MMC 具有单相功率特性^[19],因此各相桥臂输出 瞬时功率分量中包含 2 倍频分量,该分量体现为交 流 MMC 各桥臂间的环流分量,且不流入 MMC 直流 桥臂。因此,对比文献[15],本文提出的级联双极型 BESS 在对称条件下无需进行复杂的相间及桥臂间 能量均衡控制,实现了储能环节与交流系统间的功 率解耦。

然而,当电网不对称或者储能系统输出三相功 率不对称时,交流侧各相瞬时功率可表达为: $p_x = p_{xavg} + p_{x2+} + p_{x2-} + p_{x20} \tag{15}$

其中, p_{xavg} 为各相功率平均值; p_{x2+} 、 p_{x2-} 和 p_{x20} 分别为 各相2倍频瞬时功率分量的正序、负序和零序分量。 p_{x2+} 和 p_{x2-} 分量对交、直流侧功率均无影响,仅表现为 交流 MMC 内部环流分量^[20]。 p_{xavg} 和 p_{x20} 分量则直接 影响储能系统交、直流侧功率特性,可表示为:

$$\begin{bmatrix}
p_{avg0} \\
p_{xavg} = \overline{\frac{1}{2} - u_{sp} i_{p} \cos \varphi_{ip} + \frac{1}{2} u_{sn} i_{n} \cos (\varphi_{un} - \varphi_{ip})} + \\
\frac{p_{avg1}}{1 - u_{sn} i_{p} \cos (\varphi_{un} - \varphi_{ip} - \frac{2x\pi}{3})} + \\
\frac{p_{avg1}}{1 - u_{sp} i_{n} \cos (\varphi_{in} - \frac{2x\pi}{3})} \\
p_{x20} = \frac{1}{2} - u_{sp} i_{n} \cos (2\omega_{0}t + \varphi_{in}) + \\
\frac{1}{2} - u_{sn} i_{p} \cos (2\omega_{0}t + \varphi_{ip} + \varphi_{un}) \\
p_{x20} = 2(p_{x20} + p_{x20})
\end{bmatrix}$$
(16)

 $|p_{\rm ac}=3(p_{\rm avg0}+p_{x20})$

其中,x=0,1,2分别对应a、b、c三相;uso,usn分别为电 网正、负序电压幅值;i_n、in分别为储能系统交流输出 正、负序电流幅值; $\varphi_{\mu\nu},\varphi_{\mu\nu}$ 分别为电网正、负序电压 流初相角。根据式(16)可知,不对称工况下各相平 均功率中包含两部分,其中 parel 为各相平均功率的等 幅部分,而 pavel 在各相中均不相等。根据功率守恒 定律可知,储能系统交流侧平均功率应与直流功率相 等(忽略换流器损耗),因此直流功率在各相中的分 量不等。与此同时交流瞬时功率中包含2倍频波动 分量,该分量将造成 MMC 直流桥臂电流、电压的 2 倍频波动。直流侧的2倍频电流分量将导致储能系 统电流应力及系统损耗增大,电池组输出谐波分量 增加,影响电池组使用寿命及储能系统的稳定性,因 此应采取相应补偿控制策略将其消除。由于本文提 出的级联双极型 BESS 的交直流独立特性,可通过对 MMC 直流桥臂控制算法中加入前馈分量抑制直流 电流中的2倍频分量,其控制框图如图5所示。



图 5 不对称补偿策略 Fig.5 Asymmetric compensation strategy

补偿策略中采用快速傅里叶变换(FFT)提取直流电流中的2倍频分量幅值,其与基准值0的偏差量 经 PI 调节器后,此调节量与直流电压的2倍频分量 相乘,以提取其相位信息,从而与图4中得到的 MMC 直流桥臂调制电压相加,作为其前馈补偿部分。当控

制达到稳态时,MMC 直流桥臂中包含有与直流母线 电压幅值相等、相位相同的 2 倍频波动分量,从而 抑制了直流桥臂 2 倍频波动。其中直流电压的 2 倍 频分量由 100 Hz 的带通滤波器 G_{bp 2}(s)提取。

4 数字-物理闭环仿真实验

4.1 物理控制系统

储能系统的物理控制器采用主从结构,通过 Ethercat 网络进行数据以及命令通信。其中主控制器 为通信主站,实现系统级控制,采用 TM320F28335 与 TMS320C6713 的双 DSP 结构,采样频率为 6.4 kHz, 主要负责储能系统交流侧电压电流采样、直流母线 电压电流采样、交流 MMC 控制算法、调制策略及各 子模块电容电压均衡控制;子控制器为从站,实现功 率单元级控制,控制算法由 TM320F28335 实现,时 序与主站相同,每一个子站可分别控制 4 个 MMC 单 元,主要负责储能系统中各子模块的直流电压电流 采样、触发脉冲生成以及电池组 SOC 均衡控制。

4.2 数字-物理闭环仿真搭建

闭环仿真在 RTDS 环境下搭建,分别在大步长与 小步长环境中搭建系统模型以及储能系统详细模 型。闭环实验中,系统电压、交流输出电流与直流母 线电压、电流分别通过功率放大器和 RTDS 前面板 输出至主控制器;子模块直流电压、储能单元输出电 流由 RTDS 前面板输出至各子控制器。与此同时,子 控制器将开关信号经由 GTDI 板卡输入至 RTDS 系 统,实现数字-物理闭环。数字-物理闭环实验如图 6 所示,其中下层控制中包含 7 个子站,分别控制 6 个交流 MMC 桥臂与 1 个 MMC 直流桥臂,构成 N=4、 M=4 的级联双极型 BESS。



图 6 级联双极型 BESS 数字-物理闭环结构图 Fig.6 Digital-physical closed-loop simulation of cascaded bipolar BESS

4.3 实验结果

级联双极型储能系统闭环仿真实验参数如下: 系统额定电压 u_s =150 V,MMC 直流母线电压 u_{dc} = 320 V,MMC 桥臂子模块数 N=4,MMC 子模块直流 电容容值 C=4400 μ F,MMC 桥臂电感 L_s =0.63 mH, MMC 直流桥臂子模块数 M=4,蓄电池组额定直流电 压 $u_b=120$ V,MMC 直流桥臂电感 $L_d=30$ μ H,开关频 率 $f_s=800$ Hz,蓄电池组总电量 $Q_T=5$ kC(1.38 A·h)。

首先对储能系统在对称工况下进行仿真,以验证 系统结构及控制算法的正确性。图 7 所示为稳态时 的充放电仿真结果。



图 7 级联双极型 BESS 充放电仿真波形 Fig.7 Simulative charging and discharging waveforms of cascaded bipolar BESS

图 8 所示为储能系统直流母线指令电流由 20 A (放电)变化为 30 A(充电)时的实验波形,输出电流 相应速度在 20 ms 以内。



图 8 级联双极型 BESS 充放电动态响应仿真波形 Fig.8 Simulative waveforms of charging, discharging and dynamic response of cascaded bipolar BESS

仿真实验中采用设定各电池组初始电量 Q_j ,并 对采样所得各蓄电池组输出电流进行积分模拟计算 蓄电池组 SOC。实验中设置蓄电池组初始电量值 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 分别为 4.75 kC、4.25 kC、3.75 kC、3.25 kC。 级联双极型 BESS 电池组 SOC 均衡控制仿真波形如 图 9 所示。



图 9 级联双极型 BESS 电池组 SOC 均衡 控制仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of SOC balancing control for battery packs of cascaded bipolar BESS

由图 9 可知,当以直流母线电流 20 A 对外放电时,经过约 2 min 后(SOC 每 0.5 s 记录一次),4 个电 池组 SOC 得到均衡。

然后,本文在2种不对称工况下对系统进行仿 真,分别为系统电压的不对称故障以及储能系统的 不对称电流输出。2种工况下 MMC 直流桥臂输出 电流直流分量均设置为 15 A,对称补偿策略在 t=0 时刻投入,其仿真结果如图 10 所示。





图 10(a)中储能系统输出负序电流幅值为 20 A; 图 10(b)中电网发生不对称故障,此时电网电压 的不对称度达到了 45%。仿真结果表明,不对称工 况下 MMC 直流桥臂中会出现较大的 2 倍频电流波 动,采用本文提出的控制策略可以有效地抑制该波 动分量。

5 结论

本文提出了一种基于 MMC 的级联双极型 BESS。 建立了其数学模型,设计多电池组 SOC 均衡策略;分 析了储能系统不对称工况下的瞬时功率特性,提出 了直流波动分量的前馈抑制策略。实时数字-物理 闭环仿真结果表明了储能系统和控制策略的有效 性。该系统特别适用于中、高压或存在较多蓄电池 组级联的应用环境。相比于现有级联储能系统结 构,该系统结构更为紧凑,且交直流环节相对独立, 便于实现储能的 SOC 均衡控制以及冗余设计,有较高 的实用价值。

参考文献:

- [1] 蔡国伟,孔令国,潘超,等.风光储联合发电系统的建模及并网控制策略[J].电工技术学报,2013,28(9):196-204.
 CAI Guowei,KONG Lingguo,PAN Chao,et al. System modeling of wind-PV-ES hybrid power system and its control strategy for grid-connected[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,28(9):196-204.
- [2] 丁明,徐宁舟,林根德. 电池储能电站静态功能的研究[J]. 电工 技术学报,2012,27(10):242-248.
 DING Ming,XU Ningzhou,LIN Gende. Static function of the battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society.2012.27(10):242-248.
- [3] 丁明,陈忠,苏建徽,等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述
 [J]. 电力系统自动化,2013,37(1):19-25.
 DING Ming,CHEN Zhong,SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation
 [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):19-25.
- [4] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004: 124-132.
- [5] 姚勇,朱桂萍,刘秀成. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用[J]. 电工技术学报,2012,27(1):85-89.
 YAO Yong,ZHU Guiping,LIU Xiucheng. Improvement of power quality of micro-grids by battery energy storage system [J].
 Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):85-89.
- [6] BARRADO J A,GRINO R,VALDERRAMA-BLAVI H. Powerquality improvement of a stand-alone induction generator using a STATCOM with battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4):2734-2741.
- [7] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术,2009,33(9):14-18.
 HUANG Wei,SUN Changhui,WU Ziping,et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology,2009,33(9):14-18.
- [8] 丁明,陈中,程旭东. 级联储能变换器直流链纹波电流的抑制策略[J]. 电工技术学报,2014,29(2):46-54. DING Ming,CHEN Zhong,CHENG Xudong A scheme for suppressing DC ripple current of cascade converter for energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014,29(2):46-54.

108

[9] 毛苏闽,蔡旭. 大容量链式电池储能功率调节系统控制策略[J]. 电网技术,2012,36(9):226-231.

MAO Sumin, CAI Xu. Control strategy for power conditioning system of large capacity cascaded battery energy storage system [J]. Power System Technology, 2012, 36(9):226-231.

- [10] MAHARJAN L,INOUE S,AKAGI H. A transformerless energy storage system based on a cascade multilevel PWM converter with star configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008,44(5):1621-1630.
- [11] MAHARJAN L,INOUE S,AKAGI H,et al. State-Of-Charge(SOC)balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(6):1628-1636.
- [12] 金一丁,宋强,刘文华. 大容量链式电池储能系统及其充放电均 衡控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):6-11.
 JIN Yiding,SONG Qiang,LIU Wenhua. Large scaled cascaded battery energy storage system with charge/discharge balancing
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(3):6-11.
- [13] 赵彪,于庆广,王立雯,等. 无主从自均流并联并网电池储能系统[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):108-112.
 ZHAO Biao,YU Qingguang,WANG Liwen,et al. Parallel grid-connected system of non-master-slave and current-sharing battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(21):108-112.
- [14] 赵彪,于庆广,王立雯,等. 用于电池储能系统并网的双向可拓 展变流器及其分布式控制策略[J]. 中国电机工程学报,2011, 31(增刊):244-251.

ZHAO Biao, YU Qingguang, WANG Liwen, et al. Bi-directional extensible converter and its distributed control strategy for battery energy storage grid-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31 (Supplement): 244-251.

[15] VASILADIOTIS M, RUFER A. Analysis and control of modular multilevel converters with integrated battery energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):163-175.

- [16] MONTESINOS-MIRACLE D, MASSOT-CAMPOS M, BERGASJA-NE J, et al. Design and control of a modular multilevel DC/DC converter for regenerative applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8):3970-3979.
- [17] 管敏渊,徐政. 模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制
 [J]. 电力系统自动化,2010,34(19):64-68.
 GUAN Minyuan,XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(19):64-68.
- [18] CAO J,SCHOFIELD N,EMADI A. Battery balancing methods: a comprehensive review[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC). Harbin, China: IEEE, 2008:1-6.
- [19] 周月宾,江道灼,胡鹏飞,等. 一种 MMC-HVDC 的直流电压波动 抑制新方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(27):36-43.
 ZHOU Yuebin,JIANG Daozhuo,HU Pengfei,et al. A new approach for suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(27):36-43.
- [20] 韩少华,梅军,郑建勇,等. 模块化多电平换流器不对称桥臂的 环流稳态分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):38-42.
 HAN Shaohua, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Steady-state analysis of unsymmetrical MMC bridge-arm circulating current [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):38-42.

作者简介:



徐云飞(1989 —), 男, 北京人, 博士研 究生, 主要研究方向为电能质量、电力电 子技术及其在电力系统中的应用(E-mail: xyfly0528@hotmail.com);

肖湘宁(1953—),男,湖南澧县人,教 授,博士研究生导师,博士,主要研究方向 为电力系统电能质量、现代电力电子技术应 用等。

Large-capacity cascaded bipolar BESS and its control strategy

XU Yunfei, XIAO Xiangning, SUN Yamin, LONG Yunbo, XU Yonghai

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A cascaded bipolar BESS (Battery Energy Storage System) is proposed for the high-voltage and large-capacity applications of multiple cascaded energy storage units, which is composed of an AC/DC converter and a DC/DC converter. Both converters adopt the multilevel modular cascading structure, which is compact, highly reliable and simple for energy control. A mathematical model is built for the system, its working principle and constraints are analyzed, and the SOC(State Of Charge) balancing strategy is designed for multiple battery packs to avoid the over-charging and over-discharging. Aiming at the large DC current fluctuation of BESS during its operation in asymmetric conditions, a feedward control strategy is proposed to smooth the DC current fluctuation. The digital-physical closed-loop simulation based on RTDS verifies the effectiveness of the proposed system structure and control strategies.

Key words: modular multilevel converter; battery energy storage system; SOC balancing strategy; asymmetric compensation strategy; digital-physical closed-loop simulation