

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.024

# 基于级联多电平换流器的两级式储能系统控制策略

叶晗<sup>1</sup>, 盛晓东<sup>1</sup>, 谢晔源<sup>1</sup>, 魏星<sup>1</sup>, 杨朋威<sup>2</sup>, 任正<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 储能技术是构建以新能源为主体的新型电力系统的关键技术和维持微网可靠稳定运行的重要保证。国内外现有理论研究及示范工程主要集中于单级式链式储能系统, 功率模块与电池系统之间无源连接, 结构简单但控制自由度不高。同时, 针对基于链式储能的电池荷电状态(state of charge, SOC)不均衡问题, 现有的相内 SOC 均衡控制策略存在不同负载率适应性不足、极度不均衡时可能过调制等缺点, 为此, 文中基于两级式链式储能系统, 研究其总体控制策略, 对相间、相内 SOC 均衡策略进行分析, 并提出一种自适应的相内 SOC 均衡策略, 详细说明均衡控制参数的设计原则。该策略能有效地改善链式储能系统在轻载、重载等不同工况下的适应性和均衡效果。最终通过仿真验证了所提控制策略的可行性和有效性, 从而为工程实施提供理论储备和技术支撑。

**关键词:** 级联多电平换流器; 链式储能; 荷电状态(SOC); 负载率; 均衡控制; 两级式链式储能系统

**中图分类号:** TM464

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)03-0217-09

## 0 引言

随着电力系统的不断发展、化石能源的日益枯竭以及当今碳达峰、碳中和的国家级战略助推, 以新能源为主体的新型电力系统发展迅猛, 成为未来电力发展的重要方向。然而新能源发电具有间歇性、波动性和不确定性, 可能对电力系统的安全稳定运行造成较大影响。储能系统是智能电网的重要组成部分, 在电力系统中配置一定容量的储能设备, 可以有效地进行削峰填谷、调频调压, 保障电力系统安全可靠运行<sup>[1]</sup>。同时, 储能系统可以提供紧急用电、需求侧响应、平滑出力波动, 解决可再生能源的波动性和不可预测性等问题<sup>[2-7]</sup>。

目前的储能方式主要有三大类: 物理储能、电磁储能、电池储能<sup>[8-9]</sup>。物理储能包含抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等; 电磁储能包含超导磁储能、超级电容储能; 电池储能包含锂离子储能及钠硫电池、液流电池、铅酸电池、镍铬电池、镍氢电池储能等。与其他类型的储能技术相比, 电池储能技术具有模块化、响应快、商业化程度高等特点, 特别是随着锂电池的快速发展, 其在储能系统建设中的应用占比越来越高<sup>[10-12]</sup>。

传统的低压储能采用三相全桥拓扑作为功率转换变流器, 交流侧经升压变压器与主网连接。目

前该方案发展相对成熟, 但单个储能单元电压等级较低, 需要经升压变压器才可达到电网电压; 单个储能单元容量较小, 为满足系统级储能容量需求, 往往需要若干个储能单元并联配置<sup>[13-16]</sup>。低压储能具有损耗相对较大、多单元协调控制复杂等缺点。基于级联多电平换流器的链式储能系统是将电池分散到每一个功率模块中, 若干功率模块级联以提高输出侧交流电压<sup>[17-18]</sup>。H 桥子模块拓扑是最常用的功率模块方案, 模块化设计便于拓展, 方便灵活, 易于实现故障冗余。电池的荷电状态(state of charge, SOC)是电池系统的关键参数, SOC 的均衡是提高电池寿命及整体运行效率的关键, 因而储能系统运行过程中需要保证相间、相内以及电池模组内各电芯的 SOC 实时均衡。文献[19-24]研究了链式储能系统的功率解耦控制方案, 实现了储能系统的有功、无功独立控制。文献[25-26]基于单级式链式储能系统, 提出了基于叠加零序电压的相间均衡控制策略, 通过叠加零序电压实现相间有功功率的调整, 从而实现相间 SOC 均衡。为加快均衡速率, 文献[27]提出了叠加负序电压的方法实现相间 SOC 均衡, 其均衡速率相比于零序电压叠加有明显提高。文献[28-29]提出了在相内模组上叠加电压调制波的方法来实现相内 SOC 均衡, 同时保证每相外特性不变, 但当相内 SOC 差异度较大时, 该方案可能会导致个别模组出现过调制。为此, 文献[30]提出了一种注入无功的方案来均衡相内 SOC, 通过调整过调制出现的边界来计算无功注入量, 避免模组出现过调制。

收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-10-10

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项“适应高比例新能源消纳的储能电站协调运行控制关键技术研究及示范应用”(2021ZD0039)

国内外现有理论研究及示范工程主要集中于单级式链式储能系统,功率模块与电池系统之间通过无源滤波设备进行连接,其结构和控制简单,但存在控制自由度不高,直流侧二次脉动可能注入电池系统等问题<sup>[26]</sup>。为此,文中基于带 DC/DC 变换器的两级式链式储能系统进行研究,给出两级式储能系统的总体控制策略,包括功率解耦控制、相内 SOC 均衡、相间 SOC 均衡、DC/DC 控制,并提出一种自适应的相内 SOC 均衡控制策略。最终通过仿真研究验证了策略的可行性和有效性,为工程实施提供了理论储备和技术支撑。

## 1 链式储能系统拓扑

### 1.1 单级式链式储能系统

基于级联多电平换流器的链式储能系统每相由  $N$  个功率模块(SM)级联而成,模块数根据系统的交流电压等级和容量需求灵活调整。SM 由 H 桥模组(带旁路开关 KM)、电池系统及两者之间的接口电路组成。

单级式链式储能系统如图 1 所示,其接口方案采用无源接口电路。常见的无源接口电路方案有:(1) LC 串联谐振,通过电感和电容的选型,设计合理的截止频率,从而达到电池侧电流滤波效果;(2) 陷波器方案,通过增加特定频率的并联陷波支路,实现对 H 桥侧特定频率的谐波电流滤除。

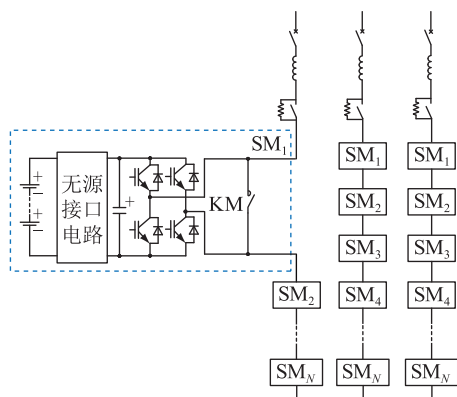


图 1 单级式链式储能系统拓扑  
Fig.1 The topology of single-stage cascaded energy storage system

单级式链式储能系统的结构简单,控制环节少,但接口电路的参数选型要求高、设计难度大,且滤波效果往往不够理想,尤其滤波设备体积较大,影响链式储能的整体优化设计。

### 1.2 两级式链式储能系统

两级式链式储能系统在 H 桥模组直流侧与电池系统之间,增加了一级 DC/DC 变换器,如图 2 所

示,提高了链式储能系统的控制自由度,使得系统控制更加灵活。基于对 DC/DC 变换器的控制,可以实现对直流侧电容电压、注入电池系统的电流谐波等的有效控制,以此保证链式储能系统的安全可靠运行。

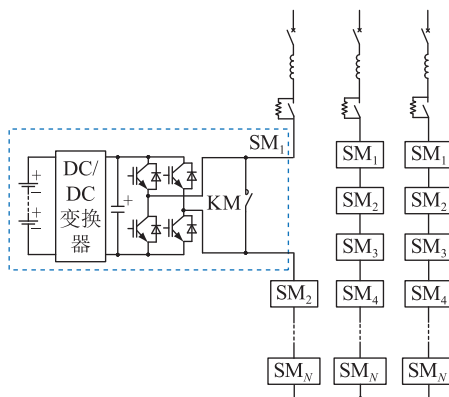


图 2 两级式链式储能系统拓扑  
Fig.2 The topology of double-stage cascaded energy storage system

DC/DC 变换器分为隔离型和非隔离型。常见的隔离型 DC/DC 变换器为双有源桥(dual active bridge, DAB)拓扑,如图 3 所示。DAB 在 2 个 H 桥拓扑之间加入了 1 个变压器,可实现电气隔离和软开关技术,但其控制相对复杂,设备体积和成本明显提高。

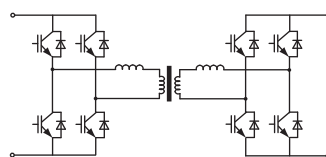


图 3 DAB 拓扑  
Fig.3 The topology of DAB

常见的非隔离型 DC/DC 变换器有双向 Buck/Boost 拓扑。针对链式储能系统的不同应用场景,双向 Buck/Boost 变换器主要有独立支路和多支路交错并联 2 个拓扑形式,分别如图 4(a)和图 4(b)所示。其中,独立支路拓扑主要应用于电池因容量小而需要并联的场合,不同支路间控制具有一定的独立性;多支路交错并联拓扑则应用于电池容量较大的场合,其支路间控制具有耦合性,等效开关频率较高,有利于消除开关频次特征谐波。另外,在拓扑选择时,还应兼顾储能系统及电池本体的安全性,减少电芯并联。

## 2 储能系统控制策略

### 2.1 总体控制策略

基于 H 桥模组和 DC/DC 变换器的两级式链式

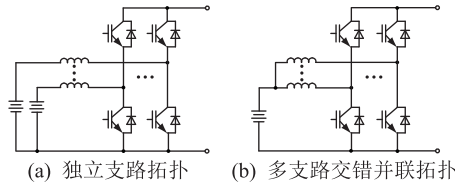


图4 双向 Buck/Boost 变换器拓扑

Fig.4 The topology of dual Buck/Boost converter

储能系统总体控制策略如图 5 所示,其包括功率解耦控制、SOC 均衡控制、直流电容电压控制和直流侧二次谐波抑制控制。其中, $P$ 、 $Q$  分别为系统有功功率、无功功率; $u_{sabc}$ 、 $i_{sabc}$  分别为系统电压、系统电流; $U_{dc}$ 、 $I_{dc}$  分别为直流电压、直流电流; $U_{bat}$ 、 $I_{bat}$  分别为电池电压、电池电流; $V_{abc}^*$  为换流器调制波信号; $D^*$  为 DC/DC 变换器占空比。功率解耦控制实现有功、无功的独立精准控制;SOC 均衡控制实现相间及相内共计  $3N$  个功率模块内电池的 SOC 均衡;直流电容电压控制主要实现 H 桥直流电容侧电压的稳定控制;谐波抑制控制主要基于 DC/DC 变换器的控制,实现对电池侧电流中二次谐波的抑制。

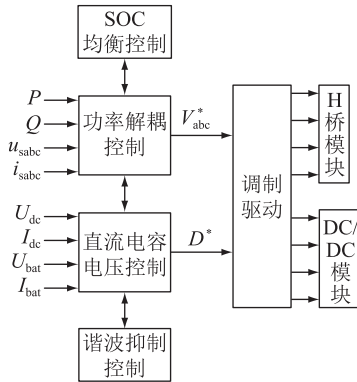


图5 两级式链式储能系统的总体控制策略

Fig.5 Overall control strategy of double-stage cascaded energy storage system

## 2.2 功率解耦控制

功率解耦控制的基本原理如图 6 所示,其中  $\theta$  为锁相环(phase locked loop, PLL)输出的系统角度; $L_s$ 、 $\omega$  分别为系统连接电抗器的电感值和系统角频率。采用 PLL 对系统电压进行锁相,并基于同步旋转坐标系对系统电压  $u_{sabc}$ 、电流  $i_{sabc}$  进行 abc/dq 变换,得到电压、电流的  $d$  轴和  $q$  轴分量  $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$ 。基于储能系统有功和无功的控制目标  $P_{ref}^*$ 、 $Q_{ref}^*$ ,结合式(1)的瞬时无功理论公式得到  $d$ 、 $q$  轴电流参考值  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$ ,叠加前馈量,进一步解耦得到  $d$ 、 $q$  轴调制电压  $v_d$ 、 $v_q$ ,再经 dq 反变换得到链式储能变流器(power conversion system, PCS)的交流侧输出电压指令。

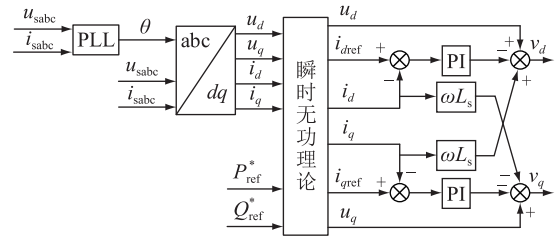


图6 功率解耦控制策略

Fig.6 Power decoupling control strategy

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_d & u_q \\ u_q & -u_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 2.3 SOC 均衡控制

基于模块化多电平的链式储能系统由三相共计  $3N$  个功率子模块构成,每个子模块包含一个电池簇,而电池簇间的 SOC 均衡是提高整体电池寿命的关键。SOC 均衡包含相内 SOC 均衡和相间 SOC 均衡。

### 2.3.1 相内 SOC 均衡

链式储能系统相内 SOC 均衡的总体目标为通过有功功率的局部调整使得相内各子模块内的电池簇 SOC 趋于一致。特别地,链式储能系统的相内 SOC 均衡针对不同的调制方式须采取不同的均衡控制策略。对于最近电平调制(nearest level modulation, NLM),依据不同功率子模块 SOC 的排序结果,合理控制子模块的投切顺序、投切时间,实现子模块充放电的差异化调整,从而局部调整有功功率以达到 SOC 均衡;而对于脉宽调制(pulse width modulation, PWM),根据各子模块与相内平均 SOC 的差值,对各子模块进行补偿电压叠加,从而实现功率的局部调整。文中提出的相内 SOC 均衡统一控制策略是基于 PWM 方式的应用场景。

相内 SOC 均值为相内所有运行子模块 SOC 值的算术平均值。文中提出的自适应相内 SOC 均衡统一控制策略的基本原理如式(2)所示,根据 SOC 偏差值对每个子模块进行电压补偿。

$$u'_{kj} = u_{kj} + m_{ckj} U_{base} \quad (2)$$

式中: $u'_{kj}$  为经过  $k$  相相内均衡补偿后的子模块  $j$  的参考电压,其中  $k=a,b,c$ ;  $j=1,2,3,\dots,N$ ;  $u_{kj}$  为功率解耦控制得到的子模块参考电压; $m_{ckj}$  为动态补偿系数; $U_{base}$  为储能系统交流电压标幺化的基准值。

$m_{ckj}$  的具体表达式如式(3)所示,其角频率  $\omega$  与电网电压角频率一致。

$$m_{ckj} = M_{ckj} \cos(\omega t + \varphi_{ck}) \quad (3)$$

式中: $M_{ckj}$  为补偿系数的幅值; $\varphi_{ck}$  为补偿系数的相位。



基于式(2)、式(3)的相内 SOC 均衡统一控制策略,通过调整  $M_{ckj}$  和  $\varphi_{ck}$ ,可实现不同应用场景下的相内 SOC 均衡。当补偿系数的相位  $\varphi_{ck}$  与子模块参考电压相位  $\varphi_{uk}$  一致或相反时,叠加补偿电压后的参考电压与补偿前一致,其原理如图 7 所示。其中,  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  为储能系统三相电压;  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$  为储能系统三相交流电流;  $u_{kj\_add}$  为子模块  $j$  因  $k$  相相内 SOC 均衡的叠加电压。

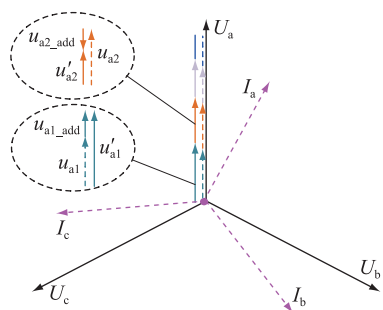


图 7 补偿电压跟随电压相位

Fig.7 Compensation voltage follows voltage phase

此时,  $\varphi_{ck}$  的具体表达式见式(4),其控制简单,补偿电压只与原参考电压相关,可靠性高。

$$\varphi_{ck} = \text{sgn}(P_0) \varphi_{uk} = \begin{cases} \varphi_{uk} & P_0 \geq 0 \\ -\varphi_{uk} & P_0 < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_0$  为储能系统从电网吸收的功率标幺值;  $\text{sgn}(\cdot)$  为单位模函数。

当补偿系数的相位与系统电流方向一致时,  $\varphi_{ck}$  的具体表达式如式(5)所示,其原理如图 8 所示。此时叠加的补偿电压在子模块上仅产生有功功率,有利于加速实现相内均衡,降低单模块过调制的可能。但由于补偿电压相位跟随电流相位,当储能系统处于轻载状态时,输出电流较小,电流的采样精度和相位跟踪精度会有所下降,一定程度上影响了控制的精确性。

$$\varphi_{ck} = \varphi_{ik} \quad (5)$$

式中:  $\varphi_{ik}$  为系统交流电流相位,其中  $k = a, b, c$ 。

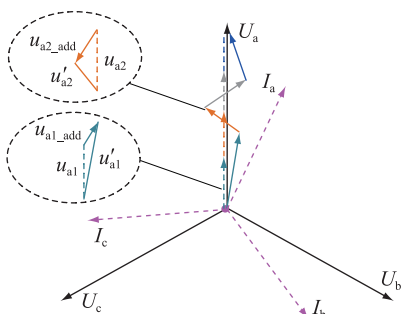


图 8 补偿电压跟随电流相位

Fig.8 Compensation voltage follows current phase

基于上述分析可知,系统处于不同的负荷运行

时,所需的均衡叠加量和所实现的精度有差异。如系统处于重载时,均衡叠加量的相位应接近电流相位,幅值应小;系统处于轻载时,为提高控制精度和均衡速率,叠加量的相位应接近于电压相位,幅值应较大。

因此,基于相内 SOC 的最大不平衡度  $\Delta S_{\max\_k}$ ,对  $M_{ckj}$  和  $\varphi_{ck}$  进行综合选取,基本原则如下。

当  $\Delta S_{\max\_k} \leq 20\%$  时,选取:

$$M_{ckj} = M_{ck}(S_k - S_{kj}) \quad (6)$$

$$\varphi_{ck} = \begin{cases} \varphi_{ik} & 0.3 \leq P_0 \leq 1 \text{ 或 } -1 \leq P_0 \leq -0.3 \\ \varphi_{uk} & 0 \leq P_0 < 0.3 \\ -\varphi_{uk} & -0.3 < P_0 < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $M_{ck}$  为相内 SOC 均衡的速度系数;  $S_k$  为  $k$  相的平均 SOC;  $S_{kj}$  为  $k$  相相内子模块  $j$  的电池 SOC。

当  $\Delta S_{\max\_k} > 20\%$  时,为避免 SOC 不平衡度太大引起补偿电压叠加量过大而导致过调制,以充电为例,采用无功注入,在保证相内 SOC 均衡的同时,有效降低子模块电压、阀段电压,其原理如图 9 所示。其中,  $U_{sm1} \sim U_{sm4}$  分别为子模块 1—4 的电压;  $U_s$ 、 $U_v$  分别为电网侧电压、换流器端电压;  $U_L$ 、 $I_L$  分别为连接电抗器电压、输出电流;  $I_p$ 、 $I_Q$  分别为有功、无功电流分量。此时  $M_{ckj}$  和  $\varphi_{ck}$  的表达式如式(8)、式(9)所示。

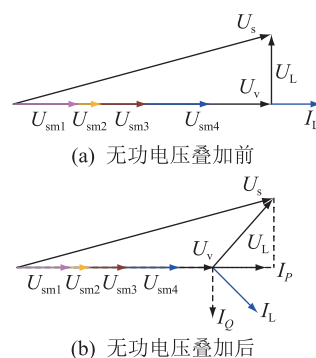


图 9 相内 SOC 不平衡度过大时均衡控制示意

Fig.9 Schematic diagram of balance control when the imbalance of intra-phase SOC is too large

$$M_{ckj} = M_{ck}(S_k - S_{kj}) - M_{qk} \text{sgn}(P_0) \quad (8)$$

$$\varphi_{ck} = \begin{cases} -\varphi_{uk} & P_0 < 0 \\ \varphi_{uk} & P_0 \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $M_{qk}$  为为了避免链式储能系统相内 SOC 均衡导致过调制而叠加的系统无功分量系数,一般不超过 0.1。

值得注意的是,链式储能系统存在视在功率上限,叠加无功功率时应保证系统的视在功率不得超限。根据链式储能系统的实时负荷情况,文中所提

的相内均衡统一控制策略具备自适应性,对系统轻载、重载等不同的动态运行工况,可结合系统参数、当前储能 SOC 以及视在功率要求,综合选取  $M_{ckj}$  和  $\varphi_{ck}$  以实现相内 SOC 的精准快速均衡。

### 2.3.2 相间 SOC 均衡

相间 SOC 均衡的基本原理及总体目标为通过重新调整三相有功功率使得三相平均 SOC 趋于一致,且不影响系统对外的功率特性,同时保证谐波含量低于国标和行业要求。

目前基于级联多电平换流器的链式储能工程容量相对较小,三相储能系统多采用星型接线方式,可通过补偿零序电压来实现三相功率的重新分配。

整个储能系统的 SOC 均值是由每相 SOC 均值进一步取均值得到。基于零序电压补偿来实现相间 SOC 均衡的原理示意如图 10 所示,其中  $U'_a, U'_b, U'_c$  为叠加补偿量之后的三相电压。由于三相电流平衡对称,即三相电流之和  $I_{\text{sum}}$  为 0,如式(10)所示,因此叠加零序电压之后储能系统的外特性基本是不变的。

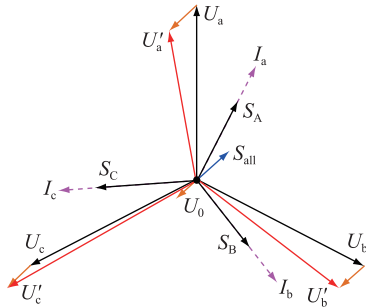


图 10 相间 SOC 均衡原理示意

Fig.10 Schematic diagram of inter-phase SOC balance

$$\begin{cases} I_{\text{sum}} = I_a + I_b + I_c = 0 \\ P_0 = I_{\text{sum}} U_0 = (I_a + I_b + I_c) U_0 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

图 10 中,将每相 SOC 平均值  $S_a, S_b, S_c$  相量化得到  $S_A, S_B, S_C$ ,其相位跟随相电流  $i_k$ ,如式(11)所示。其中,  $S_{\text{all}}$  为  $S_A, S_B, S_C$  的合成量;  $U_0$  为基于  $S_{\text{all}}$  的零序叠加电压。

$$\begin{cases} S_A = S_a \cos(\omega t + \varphi_{ia}) \\ S_B = S_b \cos(\omega t + \varphi_{ib}) \\ S_C = S_c \cos(\omega t + \varphi_{ic}) \end{cases} \quad (11)$$

则补偿后的电压  $u'_k$  如式(12)所示。

$$u'_k = u_k + \lambda U_{\text{base}} (S_A + S_B + S_C) \quad (12)$$

式中:  $u_k$  为三相初始的参考电压;  $\lambda$  为相间均衡系数,为兼顾相间 SOC 的均衡以及电能质量的要求,要结合系统的相间 SOC 最大差异性。一般相间均衡系数的绝对值  $|\lambda|$  不宜超过 1。

## 2.4 DC/DC 变换器控制

DC/DC 变换器控制主要包括直流电容电压控制与电池侧电流谐波控制。文中控制方法主要基于非隔离型 DC/DC 变换器——双向 Buck/Boost 变换器,其拓扑如图 4(b) 所示。电池接入 DC/DC 变换器的输入侧(低压侧),H 桥模组的直流电容接入 DC/DC 变换器的输出侧(高压侧),即:

$$\begin{cases} U_{\text{in}} = U_{\text{bat}} \\ U_{\text{out}} = U_{\text{dc}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\frac{U_{\text{dc}}}{U_{\text{bat}}} = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{1}{1-D} \quad (14)$$

式中:  $U_{\text{in}}, U_{\text{out}}$  分别为 DC/DC 变换器的输入侧电压和输出侧电压;  $D$  为双向 Buck/Boost 变换器桥臂下管的占空比。

因此,可通过控制占空比  $D$  实现对直流侧输出电压的有效控制,总体控制方案如图 11 所示。控制外环将直流侧电容电压控制到目标值  $V_{\text{deref}}$ ,控制内环采用电流环,与直流电流  $I_{\text{dc}}$  进行比较。多支路交错并联时,外环输出给到每一支路的电流内环输入端。电流内环包含二次谐波抑制,可实现对直流侧馈入的二倍频波动的有效控制。对于大容量链式储能系统,直流侧采用多个 DC/DC 变换器交错并联,如图 4(b) 所示,此时电流内环可用于多支路的均流控制。

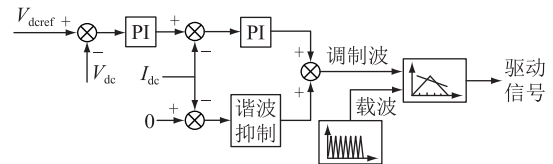


图 11 双向 Buck/Boost 变换器控制策略

Fig.11 Dual Buck/Boost converter control strategy

## 3 仿真研究

### 3.1 链式储能仿真系统模型

为验证文中所提控制策略的可行性和有效性,搭建如图 12 所示的系统架构进行仿真,系统参数如表 1 所示。系统电压为 10 kV,每相共有 12 个模块,系统容量为 4 MV·A。其中,  $C_L, C_H$  分别为 DC/DC 变换器的低压侧电容和高压侧电容;  $R_{\text{dc}}$  为直流均压电阻;  $C_{\text{dc}}$  为子模块直流电容;  $L_{\text{dc}}$  为 DC/DC 变换器的电感;  $I_{\text{N1}}$  为电池侧输入电流;  $I_{\text{H}}$  为 DC/DC 变换器的高压侧电流;  $L$  为交流侧串联电抗器。

### 3.2 仿真结果

基于 3.1 节的仿真系统参数进行仿真,所得结果如下。

(1) 稳态功率输出。稳定功率输出时的仿真波

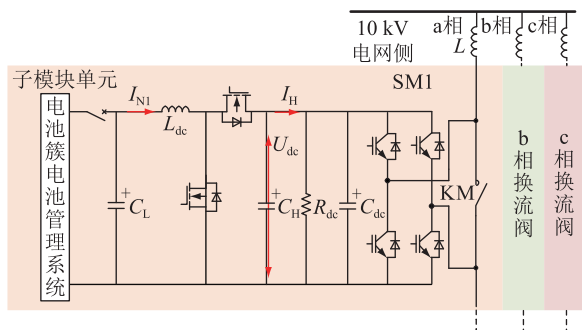


图 12 链式储能仿真系统整体架构

Fig.12 Overall structure of cascaded energy storage simulation system

表 1 仿真系统主要参数

Table 1 The main parameters of simulation system

参数	数值
电网交流电压/kV	10
交流侧额定电流/A	200
交流侧串联电抗器 L/mH	12
单相子模块数目 N	12
直流电压 $U_{dc}/V$	900
子模块直流电容 $C_{dc}/\mu F$	5 000
电池电压 $U_{bat}/V$	600
电池簇平均等效内阻 $R_{bat}/\Omega$	0.250 5

形如图 13 所示。其中,  $U_{dc,1a}$  为 a 相子模块单元 1 的直流电容电压;  $P_{ch}$  为链式储能系统的充电功率;  $U_{inva}$ 、 $U_{invb}$ 、 $U_{invc}$  为三相阀端电压;  $S_{t,1a}$ — $S_{t,3a}$  分别为 a 相子模块单元 1—3 的电池簇 SOC;  $S_{t,aveA}$ 、 $S_{t,aveB}$ 、 $S_{t,aveC}$  为三相所有子模块单元 SOC 的平均值, 所有 SOC 计算均采用时间尺度压缩进行等效。仿真初始化时, 设置相内子模块单元 SOC 和相间的平均 SOC 具有一定差异化。

0.4 h 之前链式储能系统逆变器未解锁, 直流侧 DC/DC 变换器控制直流电容电压为 0.9 kV; 0.4 h 时储能逆变器解锁, 并进入功率控制模式, 控制链式储能有功输出 0.5 p.u., 无功输出 0; 0.8 h 时储能系统从放电状态转换为充电状态, 功率值为 0.5 p.u.。从波形可以看出, 直流电压稳定在 0.9 kV, 有功持续稳定在控制目标值。从  $S_{t,1a}$ — $S_{t,3a}$  的波形中可以看出, 在储能系统与电网进行有功交换时, 相内均衡策略使得相内的 SOC 差异逐渐缩小; 从  $S_{t,aveA}$ — $S_{t,aveC}$  的波形中可以看出, 相间均衡策略使得三相之间的 SOC 差异在逐渐缩小, 充放电过程中交流侧电压和电流稳定, 体现了控制策略的优越性能。

(2) 轻载输出。降低负载, 使储能系统与电网交互的功率为 0.25 p.u., 此时仿真波形如图 14 所示。从  $S_{t,1a}$ — $S_{t,3a}$  的波形中可以看出, 虽然轻载下均衡速度放缓, 但相内 SOC 均衡的效果依然显著, 相

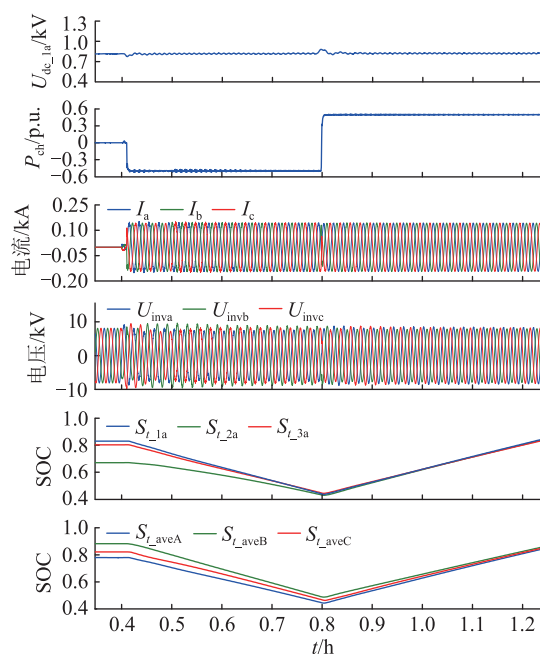


图 13 链式储能系统功率输出仿真波形

Fig.13 Simulation waveforms of cascaded energy storage system on power output

内电池簇 SOC 的差异逐渐趋于一致, 从而验证了所提相内均衡策略的可行性。

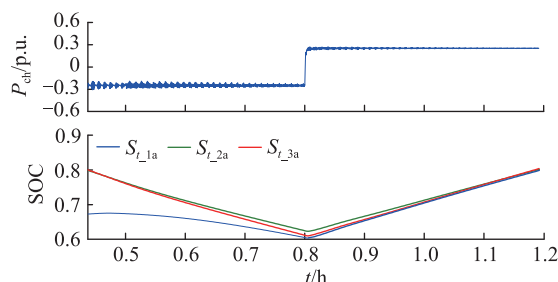


图 14 链式储能系统 SOC 均衡效果仿真波形

Fig.14 Simulation waveforms of cascaded energy storage system on SOC balance

(3) 谐波抑制。仿真模型中谐波抑制采用了比例谐振 (proportion resonant, PR) 环特定谐波滤除方法, 加入 DC/DC 变换器前后的对比仿真波形如图 15 所示。其中,  $U_{dc,1}$ 、 $U_{dc,2}$  分别为有、无 DC/DC 变换器时直流电容电压;  $I_{dc,1}$ 、 $I_{dc,2}$  分别为有、无 DC/DC 变换器时的电池侧电流。0.4 h 之前, DC/DC 变换器控制直流电压为 0.9 kV, 0.4 h 时储能逆变器解锁, 控制功率为 0.5 p.u., 0.8 h 时改变有功功率方向。从图 15 中可以看出, 对于 0.5 p.u. 功率输出工况下, 加入 DC/DC 变换器可以有效稳定直流电容电压, 使其在 SOC 变化时, 电容电压不随着电池电压的变化而变化, 降低过调制的可能, 有利于提高电池的利用率和系统输出性能。在无 DC/DC 变换器的单级式储能系统中, 电池侧电流二倍频波动明



显,但在加入 DC/DC 变换器的谐波控制之后,电池侧电流的二倍频波动得到显著抑制,降低了二倍频电流对电池的伤害。

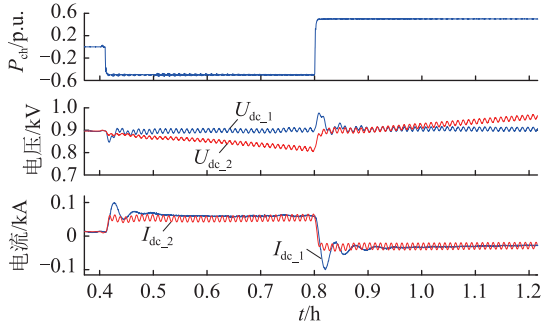


图 15 链式储能系统谐波抑制仿真波形

Fig.15 Simulation waveforms of cascaded energy storage system on harmonic suppression

由上述仿真结果可知,加入了 DC/DC 变换器的两级式链式储能系统在充电和放电、轻载和重载工况下均可实现功率精确输出、直流电压恒定、电池侧谐波抑制、相间相内 SOC 均衡等功能,具有较好的稳态和动态性能,从而也验证了文中所提的自适应相内 SOC 均衡策略的可行性和有效性。

## 4 结语

链式储能系统采用级联式拓扑,将原本需要大量电池簇并联的“电池堆”拆解到每个子模块单元内,交流侧级联后直接接入电网,具备调频调峰时间短、速度快、响应一致性好等优势,同时采用 SOC 均衡和子模块冗余技术,不仅可以保证各子模块电池簇的电量均衡,避免“木桶效应”,还可以保障电池簇或者子模块异常后继续运行,有效地提高储能系统的可用率和可靠性。

文中基于两级式链式储能拓扑,研究了系统总体控制策略,并提出了一种具备自适应功能的相内 SOC 均衡策略,在不同运行工况下通过调整均衡系数来达到均衡效果。通过搭建仿真模型验证了所提控制策略的有效性和可行性,为后续的工程发展提供了理论储备。

## 致谢

本文得到南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司项目“中压兆瓦级有源型模块化换流器研制”(JS2001709)资助,谨此感谢!

## 参考文献:

[1] 李煜阳,李相俊,刘国静,等. 适应多功能需求的储能系统优化运行研究[J]. 供用电,2021,38(6):29-34,42.  
LI Yuyang, LI Xiangjun, LIU Guojing, et al. Research on distributed energy storage operation majorization under multiple ap-

plication scenarios[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(6): 29-34, 42.

- [2] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化,2017,41(11):8-16,38.  
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [3] JIANG W, ZHU C W, XUE S, et al. DC-side-fault-tolerant control of a battery-supercapacitor hybrid energy storage system based on cascaded multilevel converter and auxiliary power loop[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7451-7460.
- [4] 许洁翔,刘威,刘树,等. 电力系统交变器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术,2022,46(9):3586-3595.  
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [5] 余斌,孟庆强,周卫华,等. 大型电池储能电站系统运行控制策略研究[J]. 供用电,2021,38(3):78-83.  
YU Bin, MENG Qingqiang, ZHOU Weihua, et al. Study on operation control strategy of large battery energy storage power station system[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(3): 78-83.
- [6] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1):1-18, 369.  
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- [7] CAI Y C, QI D L. A distributed VSG control method for a battery energy storage system with a cascaded H-bridge in a grid-connected mode[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(4):343-352.
- [8] 孙玉树,杨敏,师长立,等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术,2020,46(1):80-89.  
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.
- [9] 刁涵彬,李培强,王继飞,等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报,2020,35(21):4532-4543.  
DIAO Hanbin, LI Peiqiang, WANG Jifei, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering complementary coordination of electric/thermal energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4532-4543.
- [10] 施泉生,丁建勇,刘坤,等. 含电、气、热 3 种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):269-276,293.  
SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, et al. Economic op-

- timal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 269-276, 293.
- [11] 张江林, 庄慧敏, 刘俊勇, 等. 分布式储能系统参与调压的主动配电网两段式电压协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 15-21, 29.
- ZHANG Jianglin, ZHUANG Huimin, LIU Junyong, et al. Two-stage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 15-21, 29.
- [12] 魏少鑫, 金鹰, 王瑾, 等. 电池型电容器技术发展趋势展望[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 748-759.
- WEI Shaoxin, JIN Ying, WANG Jin, et al. Prospect for development trend of battery-capacitor technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 748-759.
- [13] 鲍建, 杨沛豪, 何昭辉, 等. 新能源混合储能提高高电压穿越能力研究[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 79-86.
- BAO Jian, YANG Peihao, HE Zhaohui, et al. Research on improving high voltage ride through capability of new energy hybrid energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 79-86.
- [14] 张江丰, 苏焯, 孙坚栋, 等. 电网侧电化学储能电站 AGC 控制策略优化及试验分析[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 173-180.
- ZHANG Jiangfeng, SU Ye, SUN Jiandong, et al. Optimization and test analysis of AGC control strategy for the grid-side electrochemical energy storage power station[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 173-180.
- [15] 于昌海, 吴继平, 杨海晶, 等. 规模化储能系统参与电网调频的控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 68-73, 105.
- YU Changhai, WU Jiping, YANG Haijing, et al. Frequency regulation strategy for power grid incorporating large-scale energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 68-73, 105.
- [16] YU J R, ZHANG G, PENG M K, et al. Power-matching based SOC balancing method for cascaded H-bridge multilevel inverter[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 352-363.
- [17] WANG Z X, HU J J, LIU B Z. Stochastic optimal dispatching strategy of electricity-hydrogen-gas-heat integrated energy system based on improved spectral clustering method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106495.
- [18] LIU C, GAO N, CAI X, et al. Differentiation power control of modules in second-life battery energy storage system based on cascaded H-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6609-6624.
- [19] 叶海涵, 陈武. 隔离型链式储能系统优化设计研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 171-179.
- YE Haihan, CHEN Wu. Optimization design of isolated cascaded energy storage system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 171-179.
- [20] 韩啸, 陈强, 李睿. 储能型模块化多电平换流器的分析与控制方法[J]. 电力电子技术, 2020, 54(2): 99-101, 112.
- HAN Xiao, CHEN Qiang, LI Rui. Analysis and control method of modular multilevel converter integrated with energy storage[J]. Power Electronics, 2020, 54(2): 99-101, 112.
- [21] 张红艳, 张建坡. 电池储能接入系统拓扑及其控制策略[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(11): 14-19.
- ZHANG Hongyan, ZHANG Jianpo. Research on PCS topologies and control of battery energy storage systems[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(11): 14-19.
- [22] 刘畅, 蔡旭, 陈强. 具有储能功能的链式 STATCOM 研究[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 21-27.
- LIU Chang, CAI Xu, CHEN Qiang. Research on cascaded STATCOM with battery energy storage system[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 21-27.
- [23] 张峰, 李睿, 凌志斌, 等. 链式电池储能功率转换系统研究[J]. 电源学报, 2013, 11(1): 34-38.
- ZHANG Feng, LI Rui, LING Zhibin, et al. Study on the cascaded H-bridge battery energy storage system[J]. Journal of Power Supply, 2013, 11(1): 34-38.
- [24] 金一丁, 宋强, 刘文华. 基于公共直流母线的链式可扩展电池储能系统及控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 66-70.
- JIN Yiding, SONG Qiang, LIU Wenhua. Control and analysis of extensible cascaded battery energy storage system based on a common DC bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 66-70.
- [25] 刘畅, 蔡旭, 李睿, 等. 超大容量链式电池储能系统容量边界与优化设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2230-2241.
- LIU Chang, CAI Xu, LI Rui, et al. Capacity boundaries and optimization design of ultra-large capacity battery energy storage system based on cascaded H-bridge converter[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2230-2241.
- [26] 蔡旭, 李睿, 刘畅, 等. 高压直挂储能功率变换技术与世界首例应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 200-211, 387.
- CAI Xu, LI Rui, LIU Chang, et al. Transformerless high-voltage power conversion system for battery energy storage system and the first demonstration application in world[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 200-211, 387.
- [27] 刘畅, 蔡旭, 陈强. 链式电池储能系统的荷电状态复合均衡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 68-77.
- LIU Chang, CAI Xu, CHEN Qiang. Compound balancing control strategy of SOC for battery energy storage system based on cascaded H-bridge converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 68-77.
- [28] 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.
- [29] 赵玲, 马骏, 方陈, 等. 中压链式梯次储能系统的电池组均衡控制策略[J]. 电源技术, 2020, 44(1): 121-125.  
ZHAO Ling, MA Jun, FANG Chen, et al. Battery equilibrium control strategy for medium voltage cascaded echelon energy storage system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44 (1): 121-125.
- [30] 陈舒钰, 刘文华, 赵香花, 等. 注入无功功率的链式电池储能系统荷电状态均衡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 83-91.  
CHEN Shuyu, LIU Wenhua, ZHAO Xianghua, et al. Balancing control strategy of state of charge for cascaded battery energy

storage system with injection of reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 83-91.

作者简介:



叶哈

叶哈(1994),男,硕士,工程师,从事电力电子技术相关工作(E-mail:yehannjust@163.com);

盛晓东(1985),男,硕士,高级工程师,从事静止无功发生器、高压级联型储能技术相关工作;

谢晔源(1978),男,硕士,研究员级高级工程师,从事柔性直流输电、柔性交流输电和无功补偿技术相关工作。

## Control strategy of double-stage cascaded multilevel converters energy storage system

YE Han<sup>1</sup>, SHENG Xiaodong<sup>1</sup>, XIE Yeyuan<sup>1</sup>, WEI Xing<sup>1</sup>, YANG Pengwei<sup>2</sup>, REN Zheng<sup>2</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd. Power Research Institute, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** Energy storage technology is the key technology to building a new power system with new energy as the main body and an important guarantee to maintain the reliable and stable operation of microgrids. Existing theoretical research and projects at home and abroad are mainly concentrated on single-level cascaded energy storage systems. The power module and battery system are connected with passive devices. The structure is simple without enough control degrees of freedom. In the meantime, aiming at an unbalanced state of charge (SOC) of the battery in cascaded energy storage, the existing intra-phase SOC balance control strategy has disadvantages such as poor adaptability to different load rates and possible over-modulation in case of extreme imbalance. Based on the double-stage cascaded energy storage system, its overall control strategy and the inter-phase and intra-phase SOC balance strategies are illustrated in this paper. An adaptive intra-phase state of charge balance strategy is proposed and its design principle of the balanced control parameters is explained in detail. The adaptability and balance effect of the cascaded energy storage system under different working conditions such as light loads and heavy loads are improved effectively. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy are verified by simulation, thus providing theoretical reserves and technical support for project implementation.

**Keywords:** cascaded multilevel converters; cascaded energy storage; state of charge (SOC); load rates; balance control; double-stage cascaded energy storage system

(编辑 陆海霞)