

级联型储能功率变换系统控制策略综述

陈亚爱,洪忆南,周京华,赵军伟

(北方工业大学 北京市变频技术工程技术研究中心,北京 100144)

摘要:级联型储能功率变换系统广泛应用于高压大容量场合,对电力系统起到削峰填谷的作用,其控制策略的好坏直接影响到储能系统的性能和可靠性。因此,近年来对级联型储能功率变换系统控制策略的研究引起了广泛关注,国内外学者对其进行了大量研究,主要可分为功率控制、均衡控制及容错控制三个方面,根据这三个方面对级联型储能功率变换系统控制策略进行了分类、归纳和总结,分析了不同控制策略的原理、特点及应用条件,并对其发展趋势进行展望,为级联型储能功率变换系统控制策略的研究和工程应用提供参考。

关键词:级联型;储能;功率变换系统;控制策略

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20915

Summary of Control Strategies for Cascaded Energy Storage Power Conversion System

CHEN Ya'ai, HONG Yinan, ZHOU Jinghua, ZHAO Junwei

(*Inverter Technology Engineering Research Center of Beijing, North China University of Technology, Beijing 100144, China*)

Abstract: Cascaded energy storage power conversion system is widely used in high voltage and large capacity occasions, it plays a role of peak shaving and valley filling for power system, its control strategy directly affects the performance and reliability of energy storage system. Therefore, in recent years, the research on the control strategy of cascade energy storage power conversion system attracts wide attention, and scholars at home and abroad did a lot of research on it, which can be divided into power control, balanced control and fault-tolerant control. According to these aspects, the control strategies of cascade energy storage power conversion system were classified, generalized and summarized, its principles, characteristics and application conditions of different control strategies were analysed, and its development trend was discussed, so as to provide a reference for the research and engineering application of control strategy of cascade energy storage power conversion system.

Key words: cascaded multilevel; energy storage; power conversion system(PCS); control strategy

近年来,随着新能源发电技术的不断发展,为提高可再生能源利用率,储能系统呈现高压大容量化,实现对电力系统的削峰填谷。其中,级联型储能功率变换系统(power conversion system, PCS)因具有模块化结构且无电池环流等问题,在可再生能源发电系统中得到广泛应用,主要起到控制功率流向和功率调节等作用,其拓扑结构和控制策略影响着储能系统的输出效率和电能质量^[1-2]。级联型储能PCS的功率模块具有多种拓扑结构,其中应用较为广泛的是DC/AC单级式结构和DC/DC+DC/AC双级式结构,前者构成的级

联型储能PCS运行效率较高,后者构成的级联型储能PCS主要工作在电压范围变化较宽的场合,但后者开关损耗更大,成本更高,相比之下,DC/AC单级式结构构成的级联型储能PCS及其控制策略受到更广泛的关注和研究^[3-4]。

级联型储能PCS控制系统设计复杂,控制策略的好坏影响着系统性能的优劣。本文以功率模块采用DC/AC单级式结构的级联型储能PCS作为主要研究对象,基于国内外多年研究成果,对级联型储能PCS控制策略进行分类、归纳和总结。

基金项目:国家自然科学基金(51777002);北京市高水平创新团队建设计划(IDHT20180502)

作者简介:陈亚爱(1961—),女,硕士,教授,Email:eya@ncut.edu.cn

1 级联型储能PCS拓扑结构及控制策略分类

图1为星接级联型储能PCS拓扑结构示意图,其采用DC/AC变换器作为功率模块,每相均由 N 个功率模块与电池并联后经级联构成,具有高度模块化的特点,能够根据储能装置要求进行扩容^[5]。当系统充电时,级联型储能PCS工作于整流状态,将电网中多余的交流电转换为直流电储存于电池中;当系统放电时,级联型储能PCS工作于逆变状态,将电池中的直流电转换为交流电释放到电网。与级联型储能PCS拓扑结构类似,MMC电池储能PCS在星接结构的基础上,将各相分为上、下桥臂两部分,并采用公共直流母线,增加了MMC在电池储能应用的多样性。

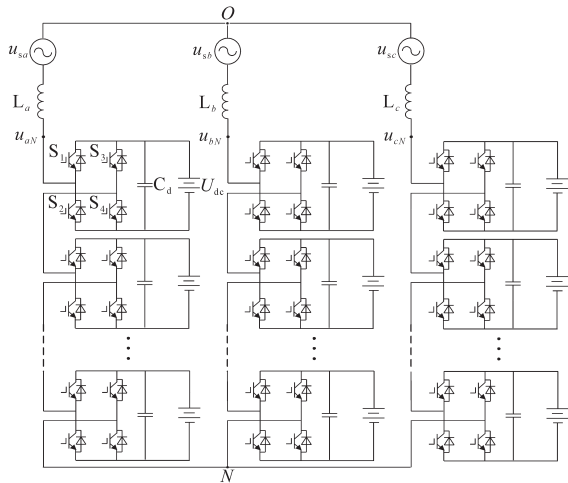


图1 级联型储能PCS拓扑结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of cascaded PCS topology structure

电池寿命的长短对储能系统成本高低和应用条件有很大影响,荷电状态(state of charge, SOC)不均衡可能引起电池过充或过放,影响储能系统的安全可靠性。而且,由于级联型储能PCS功率模块数量较多,储能系统结构更加复杂,导致功率开关器件出现故障的概率增加,当某相有功率模块出现故障且无法正常工作时,为保证三相输出功率相同,该相其余非故障模块的放电量会增加,由此可能引发功率器件过流,且经过长时间的充、放电工作后,系统会出现相间SOC不均衡现象,影响系统稳定运行,严重时将导致系统停机。对于MMC电池储能PCS,由于拓扑结构与级联型PCS相似,不仅需要控制电池SOC及容错,还需解决系统上、下桥臂间SOC均衡及环流问题,因此MMC电池储能PCS控制策略更

复杂,在实际储能应用中大多采用级联型储能PCS。表1列出了MMC电池储能PCS与级联型储能PCS的优缺点,以便对比。根据级联型储能PCS与MMC电池储能PCS拓扑结构的对比及电池SOC的分析可知,级联型储能PCS在实际应用中优势更加明显,采取相应控制策略使储能系统安全稳定地运行具有十分重要的意义^[6-7]。

表1 MMC电池储能PCS与级联型储能PCS对比表

Tab.1 Comparison between MMC battery energy storage PCS and cascaded energy storage PCS

拓扑结构	优点	缺点
MMC 电池 储能 PCS	①模块化,易实现冗余	①变换器数量多,成本高
	②高效率、高可靠性	②存在环流问题
	③具有公共直流母线, 应用场景更加广泛	③控制策略更加复杂
	④电平数较高	④级联数目较多时, 故障检测困难
级联型 储能 PCS	①模块化,结构简单	①电池数量多,成本高
	②高效率、高可靠性	②级联数目较多时, 故障检测困难
	③无环流问题	

级联型储能PCS控制系统主要由电池管理系统(battery management system, BMS)、控制器、PWM驱动环节组成,其控制原理图如图2所示。BMS用以检测电池状态,例如电池电流、电池SOC、电池温度等信息,并将信号传输至控制器。控制器将指令信号与控制信号按照所采用的控制策略进行闭环控制,计算出调制信号。PWM驱动环节将控制器中计算得到的调制信号与载波信号进行比较,生成PWM驱动信号,从而控制开关管的开通和关断^[8]。

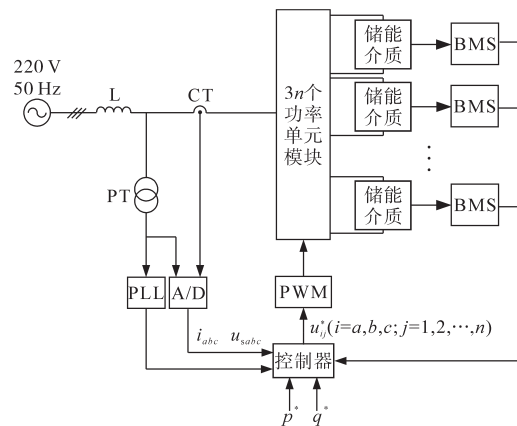


图2 级联型储能PCS控制系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of cascade PCS control system

为保证系统的稳定运行,需要对级联型储能PCS的控制策略进行研究,主要包含功率控制、均衡控制及容错控制三个方面,图3所示为级联型储能PCS控制策略分类图^[5]。

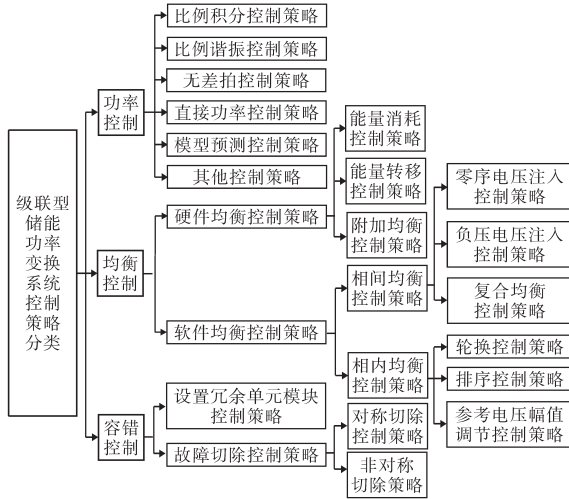


图3 级联型储能PCS控制策略分类图

Fig.3 Schematic diagram of cascaded PCS control strategy classification

2 功率控制

级联型储能PCS具有对电网削峰填谷、平抑功率波动等多种功能,为实现以上功能,需要对系统有功和无功功率进行控制,即对有功和无功功率解耦,以实现储能系统输出功率指令的快速跟踪^[9]。表2给出了各种功率控制策略的优缺点,以便对比。

表2 各种功率控制策略对比表

Tab.2 Comparison table of power control methods

功率控制策略	优点	缺点
比例积分控制策略	①结构简单,可靠性高 ②应用广泛,技术成熟 ③无静态误差	系统不稳定时,超调量大,母线电压波动大
比例谐振控制策略	①计算量小,易于实现 ②动态响应速度快 ③稳态误差小 ④适用于工程应用	①对参数敏感 ②为抑制谐波增加了控制难度
无差拍控制策略	①控制精度高 ②动态响应速度快	①需与观测器配合取得良好控制效果 ②算法复杂,较难控制
直接功率控制策略	①动态响应速度快 ②算法执行时间短	①稳态纹波较大 ②开关频率低
模型预测控制策略	①动态性能好 ②鲁棒性强 ③对电流快速跟踪	①开关频率较低 ②不能保证控制精度
神经网络控制策略	①稳态精度高 ②对负载或直流输入电压变化的适应能力强	①算法复杂 ②鲁棒性和实时性低 ③不适用于复杂的被控系统
模糊控制策略	①鲁棒性好 ②抗干扰力强 ③对复杂系统具有良好控制效果	①消除系统稳态误差的性能差 ②控制精度低 ③在控制点附近可能出现盲区 and 死区
重复控制策略	①跟踪效果好 ②可抑制周期性扰动	①存在信号指令的周期延时 ②瞬时响应速度慢

文献[10]采用比例积分(proportional integral, PI)控制策略,基于同步旋转坐标系,将系统交流流量转化为直流量,并对耦合项进行前馈解耦控制,简化了系统设计。其中基于PI调节器的电流前馈解耦控制策略表达式为

$$\begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sd} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - K_p \begin{bmatrix} i_d^* - i_d \\ i_q^* - i_q \end{bmatrix} - K_I \int \begin{bmatrix} i_d^* - i_d \\ i_q^* - i_q \end{bmatrix} dt \quad (1)$$

式中: u_d^*, u_q^* 分别为同步旋转坐标系下调制电压指令值; i_d^*, i_q^* 分别为同步旋转坐标系下电流指令值; u_{sd} 为同步旋转坐标系下系统交流侧输出电压值; i_d, i_q 分别为同步旋转坐标系下系统交流侧输出电流值; L 为电感; K_p, K_I 分别为比例增益和积分增益。

等式右侧前两项用以抵消电网电压和稳态时的电抗压降,后两项为PI调节器表达式。

根据式(1)可得如图4所示的PI控制策略控制框图,PI调节器的输出与电网电压前馈进行叠加得到的 u_d^*, u_q^* 经 $2\pi/3s$ 坐标系变换后,最终输出三相电压PWM调制信号 $u_{aN}^*, u_{bN}^*, u_{cN}^*$ 。

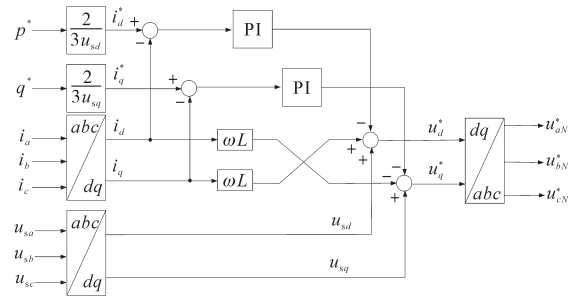


图4 基于PI调节器的功率控制框图

Fig.4 Power control block diagram based on PI regulator

PI控制策略是目前应用最广泛的一种功率控制方式,具有结构简单、可靠性高、技术成熟、无静态误差等优点,但当系统不稳定或受到扰动时,存在超调量大、母线电压波动大等问题。

文献[11]采用比例谐振(proportional resonant, PR)控制策略,基于两相静止坐标系,避免了静止坐标系变换到旋转坐标系的复杂计算问题,而且在数学意义上二者等价。理论上PR调节器在某一频率下具有无穷大的增益,可实现对系统交流量的无静差跟踪。其中有功功率、无功功率指令值与指令电流 i_α^*, i_β^* 之间的关系为

$$\begin{cases} i_\alpha^* = \frac{u_{s\alpha}}{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2} p^* + \frac{u_{s\beta}}{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2} q^* \\ i_\beta^* = \frac{u_{s\beta}}{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2} p^* + \frac{u_{s\alpha}}{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2} q^* \end{cases} \quad (2)$$

基于PR调节器的级联型储能PCS输出电压指令值 u_α^*, u_β^* 的表达式为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha^* \\ u_\beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} - K_p \begin{bmatrix} i_\alpha^* - i_\alpha \\ i_\beta^* - i_\beta \end{bmatrix} - K_R \begin{bmatrix} i_\alpha^* - i_\alpha \\ i_\beta^* - i_\beta \end{bmatrix} dt \quad (3)$$

根据式(2)、式(3)可得如图5所示的PR控制策略控制框图,指令电压 u_α^*, u_β^* 经过 $2s/3s$ 变换后,得到三相电压PWM调制信号。

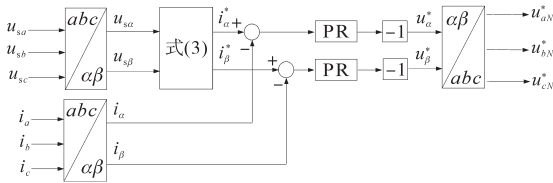


图5 基于PR调节器的功率控制框图

Fig.5 Power control block diagram based on PR regulator

PR控制策略计算量较少,易于数字实现,具有较快的动态响应速度和较小的稳态误差,更适合工程应用,但PR调节器对参数过于敏感,为抑制所选频率处的谐波含量,有时不得不采用多个PR调节器同时工作,增加了控制难度。

文献[12]采用无差拍控制策略,根据储能系统电路参数和输出电流反馈值对下一采样周期结束时的参考指令电流进行预测,并不断调整预测值,使系统的输出电流可以准确跟踪参考指令电流。文献[13]将这种控制策略应用于H桥静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)中,并构造离散滑模观测器对STATCOM实际的输出电压值进行观测,减小了预测值与实际输出值之间的误差。无差拍控制策略具有控制精度高、动态响应速度快等特点,但为提高实时性,需要考虑添加观测器以实现精准预测,增加了控制策略复杂度,使计算量增大。

文献[14]采用直接功率控制(direct power control, DPC)策略,基于瞬时功率理论,通过分析系统交流侧电压矢量对有功及无功功率的影响,得到一个优化矢量表,然后根据电网电压矢量的位置从矢量表中选择一个可以同时减小有功功率和无功功率与给定值之间误差的电压矢量,以更精细地调节有功功率与无功功率。该控制策略对系统功率进行闭环控制,具有动态响应快、算法执行时间短等特点,但稳态纹波较大,开关频率较低,控制效果与矢量表的精确程度相关。

文献[15-16]采用模型预测控制(model predictive control, MPC)策略,并将其应用于H桥级

联型静止无功发生器(static var generator, SVG),根据系统模型对未来一段时间内系统状态进行预测,以滚动优化的方式确定当前最优策略,使被控量与指令值偏差最小。该策略具有良好的动态性能,能够对电流快速跟踪,易于数字实现,但开关频率较低,受系统采样误差影响可能导致对被控系统的预测存在较大偏差。

除以上控制策略外,还有许多其他控制策略可以同样应用于功率控制中。文献[17]对神经网络控制策略进行了简要分析和介绍,文献[18]将神经网络控制策略用于PWM逆变器中,文献[19]采用模糊控制策略,文献[20]采用重复控制策略。这些策略均在系统的功率控制方面取得了良好效果,不再赘述。

3 均衡控制

对于级联型储能PCS,随着系统充放电过程的进行,由于各电池生产工艺和自放电特性等原因,会导致电池间SOC产生差异,随着时间的推移,差异可能被放大,且由于流过各功率模块电流相等,容易引发电池出现过充、过放的现象,影响系统可靠性。因此,各电池SOC是否均衡成为制约储能系统可利用率大小的关键因素。

现今,锂电池因具有较高的能量密度(50~130 W·h/kg)、无记忆效应、安全性能高以及使用寿命长等优点,广泛应用于高压大容量储能系统中。因此,为保证系统内部各功率模块SOC均衡以提高系统的有效容量,改善电能质量,维持系统的稳定运行,本文对储能介质采用锂电池的级联型储能PCS的SOC均衡控制进行分析^[21]。

3.1 硬件均衡控制策略

文献[22]介绍了两种SOC均衡控制策略,一种是能量消耗型均衡控制策略,即将SOC过高的电池能量通过功率器件消耗,实现各单体间均衡。这种策略控制简单,成本低廉,但均衡速度较慢,功率器件发热较高,有可能影响储能系统的寿命。另一种是能量转移型均衡控制策略,将能量较高的电池能量转移到能量较低的电池中实现各单体间SOC均衡,与能量消耗型均衡控制策略相比,该策略对电量的损耗较少,发热较低,但需考虑电池间隔离及传输路径长短,否则可能造成电池短路等问题。文献[23]采用附加均衡电路控制策略,即在每个功率模块直流侧加装一个辅助逆变器,通过隔离变压器与公共交流电源母

线连接,根据SOC差值由辅助逆变器从公共母线吸收或释放能量,维持各电池SOC均衡状态。硬件均衡控制策略虽然操作简单,但系统成本高,均衡效果较差,有可能给系统的稳定运行带来影响,因此在实际工程中应用较少。

3.2 软件均衡控制策略

为保证级联型储能PCS不因发热等原因造成损坏,在实际应用中大多采用软件均衡控制策略以维持系统SOC均衡。软件均衡控制策略主要包含相间均衡控制和相内均衡控制两方面。

3.2.1 相间均衡控制策略

为保证系统三相SOC均值相等,输出功率相同,需要对级联型储能PCS进行相间均衡控制。相间均衡控制策略主要分为零序电压注入控制策略、负序电压注入控制策略和零序电压+负序电压注入的复合均衡控制策略三种。文献[21]采用零序电压注入控制策略,零序电压注入矢量图如图6所示。通过选取适当的零序电压 u_0^* 的幅值和相角,以改变各相交流侧输出电压 u_{aN}^* , u_{bN}^* 及 u_{cN}^* 的方向和幅值大小,使系统根据调整后的交流侧输出电压 $u_{a'N}^*$, $u_{b'N}^*$ 及 $u_{c'N}^*$ 对总功率重新分配,达到三相SOC均衡的目的。

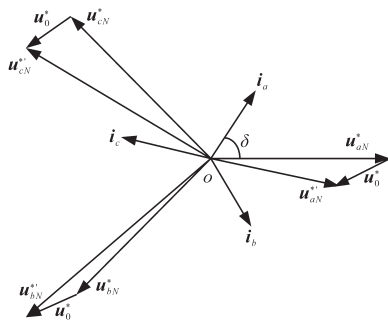


图6 零序电压注入矢量图

Fig.6 Zero-sequence voltage injection vector diagram

零序电压注入策略是目前采用较多的相间均衡控制策略,其控制框图如图7所示^[21],将各相SOC均值与整体SOC均值作差,经计算得到该相SOC补偿量,并与原SOC叠加,进行闭环控制。该策略在图1所示的系统中不会产生零序电流,不改变系统总功率,不影响系统输出性能,不增加系统成本,且易于实现,但仅对相间SOC不均衡度较小的系统均衡效果好,当相间不均衡度较大时,所需注入的零序电压幅值增加,易导致各功率模块输出电压超调,失去均衡作用。图中, K_0 为比例系数; I_i 为系统第*i*相电流有效值; $D_i(s)$ 为系统第*i*相开关损耗等功率扰动; P_{i0} 为系统第*i*

相所需调整功率; W 为系统总额定能量。

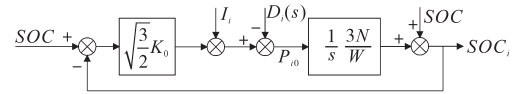


图7 相间SOC均衡控制框图

Fig.7 Block diagram of interphase SOC equilibrium control

文献[24]采用负序电压注入控制策略实现相间SOC均衡,由于正序电压影响储能系统吸收有功功率,因此可通过改变系统输出负序电压的幅值和相位,从而改变有功功率在三相间的分配,达到三相SOC均衡的目的。与零序电压注入策略相比,负序电压注入策略的均衡能力较强,在不均衡度相同的条件下所注入的负序电压幅值小于零序电压幅值,更适用于相间不均衡度较大的储能系统,且该策略不易引起功率模块超调。但注入负序电压的同时会给系统引入负序电流,对级联型储能PCS的电能质量和输出性能造成影响,在实际应用中具有一定局限性^[25]。

为更好实现级联型储能PCS相间SOC均衡控制,文献[26]将零序电压注入控制策略与负序电压注入控制策略相结合,即在系统不均衡度较小时采用零序电压注入策略,反之采用负序电压注入策略,使系统更稳定地应用于复杂的不均衡条件下。根据对负序电压注入控制策略的分析可知,这种复合均衡控制策略同样存在负序电流对储能系统电能质量影响较大的问题,因此文献[27]对复合均衡控制策略进行改进,给零序电压和负序电压分别引入系数*m*和*n*,既缓解了负序电流对储能系统输出性能的影响,又解决了不同均衡模式间切换的平滑过渡问题,最后通过仿真验证了该控制策略的正确性和有效性。

3.2.2 相内均衡控制策略

在系统相间SOC均衡的基础上,需要对相内SOC进行均衡控制。文献[28]采用阶梯波调制策略,使各功率模块在任意工作周期内均保持固定的开关序列,并保证该开关序列在每一工作周期内轮换一次,使各功率模块平均开关状态相同,从而保证各电池容量均衡。文献[29]采用载波层叠轮换调制策略,即在不同载波周期内对各开关序列依次进行轮换,以平滑各功率模块的输入输出功率。轮换策略算法简单,易于控制,但对均衡结果无反馈调节,抗干扰能力弱,均衡效果差。

文献[28]采用排序策略,其算法与轮换策略算法相似,保证SOC较高的功率模块放电率增

加, SOC 较低的功率模块充电率增加, 实现各功率模块电池相内 SOC 均衡。与轮换策略相比, 排序策略增加了反馈调节, 形成闭环控制, 抗干扰能力强, 但算法较复杂, 当级联的功率模块个数较多时, 排序计算时间较长。

文献[21]采用参考电压幅值调节策略, 根据各电池 SOC 与该相电池 SOC 均值之间的差值, 在各功率模块输出电压上分别叠加所需电压以改变各功率模块输出电压幅值大小, 对系统该相功率重新分配, 达到相内 SOC 均衡的目的。各功率模块所需叠加的电压产生示意图如图 8 所示。图 8 中, $SOC_k (k=a, b, c)$ 为三相 SOC 均值, $SOC_{kj} (j=1, 2, \dots, n)$ 为某相第 n 个电池的 SOC 值, ΔSOC_{kj} 为某电池模块与该相 SOC 均值之差, K_1 为所需叠加电压的增益。若以系统 a 相为例, 其相内 SOC 均衡控制框图如图 9 所示^[21], 根据各电池模块 SOC 与该相 SOC 均值作差, 经计算得到各电池模块 SOC 补偿量, 并最终与原 SOC 叠加, 进行闭环控制。该控制策略响应速度较快, 均衡效果良好, 适用于实际工程应用, 但随着级联数目的增加, 其算法更加复杂。

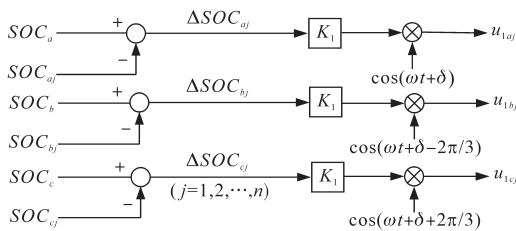


图 8 各功率模块所需叠加的电压产生示意图

Fig.8 Schematic diagram of superimposed voltage required for each power unit

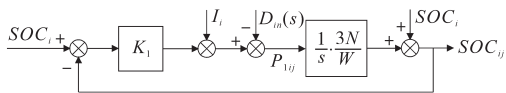


图 9 a 相相内 SOC 均衡控制框图

Fig.9 Block diagram of SOC equilibrium control in phase a

硬件均衡控制方法会对储能系统稳定性造成较大影响, 甚至产生资源浪费; 软件均衡控制方法虽然算法复杂, 但更适用于高压大容量系统的均衡控制, 其中基于零序电压注入策略的相间均衡控制已应用于南方电网深圳碧岭储能电站, 并取得了较好的控制效果^[6]。表 3 列出了各种均衡控制策略优缺点, 以便对比。与级联型储能 PCS 相似, MMC 电池储能 PCS 同样存在相间与相内 SOC 均衡问题, 可采用与级联型储能 PCS 相同的控制策略解决。由于 MMC 电池储能 PCS 各相

均存在上、下桥臂, 因此还需对桥臂间 SOC 均衡进行研究。文献[30]采用基频电流注入法, 通过调节基频电流达到桥臂间 SOC 均衡的目的; 文献[31]介绍了重新分配上、下桥臂直流电压分量的均衡控制方法, 但导致系统交流侧出现直流电流分量, 影响系统稳定性。相比级联型储能 PCS, MMC 电池储能 PCS 的均衡控制策略更加复杂且多样, 因此论文不再进行赘述。

表 3 各种均衡控制策略对比表

Tab.3 Comparative table of equilibrium control methods

均衡控制策略	优点	缺点
能量消耗控制策略	①操作简单	①均衡效果差
能量转移控制策略	②无需复杂算法	②系统成本高
附加均衡电路策略		③影响系统稳定运行
零序电压注入相间均衡控制策略	①不产生零序电流 ②对系统总功率、性能、成本不产生影响 ③易于实现	仅对不均衡度较小的系统有良好均衡效果
负序电压注入相间均衡控制策略	①适用于相间不均衡度较大系统 ②不易引起功率模块的超调	给系统引入负序电流, 影响系统电能质量和输出性能
零序电压+负序电压注入相间均衡控制策略	①适用场景灵活 ②均衡效果好	①算法复杂 ②引入负序电流影响系统电能质量
轮换相内均衡控制策略	①算法简单 ②易于控制	①开环控制 ②抗干扰能力弱 ③均衡效果差
排序相内均衡控制策略	①闭环控制 ②抗干扰能力强	①算法复杂 ②级联数目较多时排序算法时间长
参考电压幅值调节相内均衡控制策略	①响应速度快 ②均衡效果好 ③适用于实际工程应用	当级联数目较多时算法复杂

4 容错控制

由于单个电池模块容量有限, 为实现储能系统的高压大容量化, 需要级联相应功率单元及电池模块数量, 构成如图 1 所示的级联型储能 PCS。随着级联数目的增加, 储能系统所包含的功率开关器件数量增多, 每一功率模块都可能因功率开关器件的短路或开路等问题而成为潜在故障点, 使系统出现故障的概率增加, 影响系统的稳定运行。因此, 在保证系统不停机的情况下, 通过采取容错控制来保证系统的有效输出具有十分重要的意义。目前, 级联型储能 PCS 的容错控制主要分为设置冗余模块和故障切除两种, 其中故障切除又可分为对称切除法和非对称切除法^[32]。

4.1 设置冗余单元模块策略

文献[33-34]采用给每相均设置一冗余功率模块实现容错控制。当级联型储能 PCS 正常运

行时,冗余模块处于旁路状态;当级联型储能PCS出现故障时,冗余模块接入系统,保证系统运行状态与故障前一致,且输出功率不变。由于在绝大多数情况下级联型储能PCS工作于非故障状态,因此给每相均设置一冗余功率模块会造成一定程度上的资源浪费,增加系统成本。文献[35]提出 $3N+1$ 冗余控制策略,此级联型储能PCS拓扑结构图如图10所示,该系统仅设置一个冗余功率模块,通过三个开关分别与三相连,在某个功率模块发生故障时迅速将其旁路并接入冗余功率模块。这种控制策略有效减少了冗余功率模块数量,降低了控制复杂度,提高了系统可靠性,较适用于系统单个功率模块发生故障的情况,当有多个功率模块发生故障时采用则控制复杂。因此,设置冗余功率模块的容错控制策略虽然操作方法简单,但在实际应用中具有较强局限性,不适用于级联数目较多或出现故障可能性较大的系统。

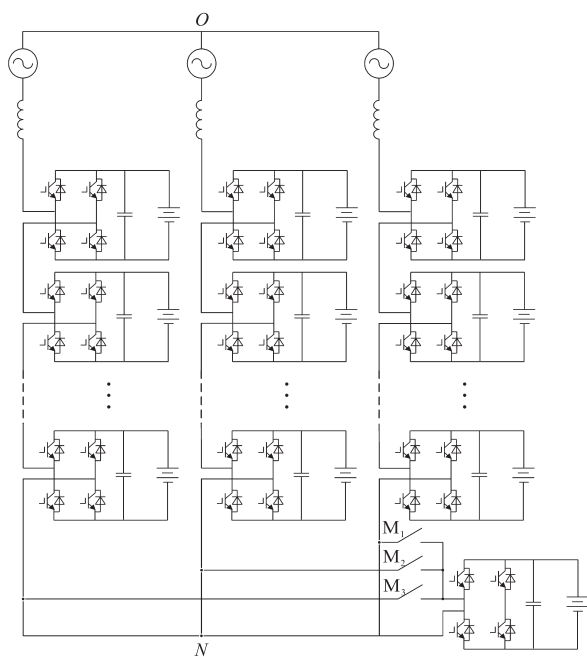


图10 $3N+1$ 冗余控制策略所用拓扑结构图

Fig.10 Topology diagram of $3N+1$ redundant control strategy

4.2 故障切除策略

4.2.1 对称切除策略

对称切除策略即当级联型储能PCS出现故障时,可以通过切除故障单元及其余两相相同位置的非故障单元模块,以确保系统输出的三相对称性,此时级联型储能PCS拓扑结构图如图11所示。文献[36]采用该容错控制策略并通过仿真验证了其有效性,证明了在这种控制策略

下的输出电压质量有所提升。对称切除策略操作简便,但以降低系统的电平数量和容量为代价,使部分非故障单元没有得到充分利用^[37],在实际应用中会使系统成本提高,造成不必要的浪费。

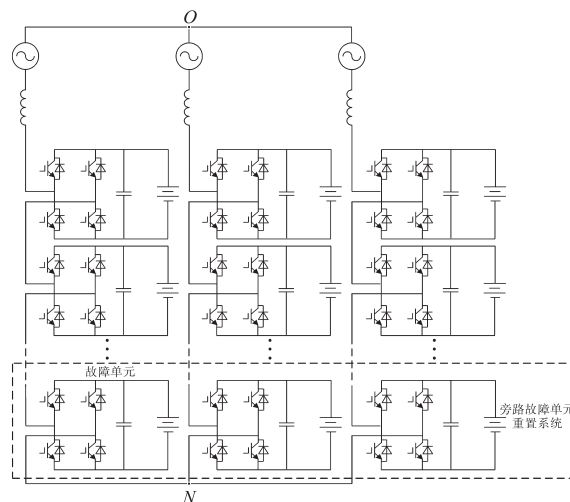


图11 对称切除策略拓扑结构示意图

Fig.11 Schematic diagram of the topological structure of the symmetric cut-off strategy

4.2.2 非对称切除策略

非对称切除策略仅切除故障模块,并采用特殊的控制策略使级联型储能PCS重新达到稳定状态。文献[38]将非对称切除策略应用于三相电机驱动中,当系统某一功率模块发生故障时,通过改变非故障模块交流侧电压相角以减少直流侧电压畸变,并通过仿真验证了该控制策略有效性。文献[36]采用零序电压注入法,使中性点发生偏移,通过改变各相调制波幅值,不仅使系统重新达到平衡,还维持了SOC均衡。图12所示为基于零序电压注入法的容错控制策略框图,图中 u_0 为所注入的零序电压,当系统正常运行时,开关 SW_1 和 SW_2 均在位置1闭合,当某一功率模块发生故障,相应开关在位置2闭合,通过改变非故障模块调制波幅值以输出相应调制波。该策略容错效果好且能保证系统SOC均衡,但当多个功率模块同时发生故障时,该策略计算复杂。

当级联型储能PCS有多个功率模块发生故障时,为保证系统的安全稳定运行,文献[39]采用基波相移补偿(fundamental phase-shift compensation, FPSC)策略,利用非故障功率模块调整三相参考电压间的相位差,从而得到较大的平衡线电压,然而该策略并不能在所有故障情况下均适用。文献[40]对FPSC策略进行改进,对两

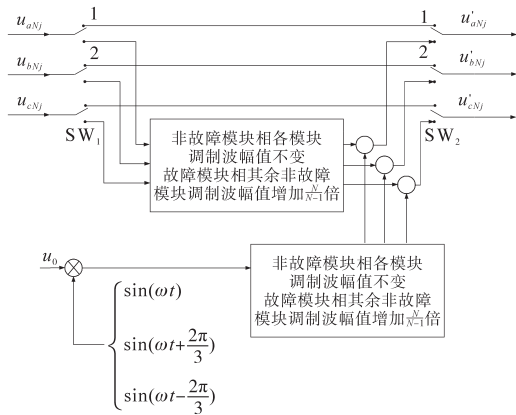


图12 基于基频零序电压注入法的容错控制策略框图
Fig.12 Block diagram of fault-tolerant control strategy based on fundamental frequency zero-sequence voltage injection method

相均有功率模块发生故障的系统,将含有故障模块的两相桥臂之间相位差调整为 180° ,并减小相应的非故障模块相的电压幅值以得到平衡线电压,该控制策略适用于各种故障情况,但算法较为复杂。

容错控制对维持级联型储能PCS的稳定运行起着至关重要的作用,表4列出了各种容错控制策略的优缺点,以便对比。

表4 各种容错控制策略对比表

Tab.4 Comparative table of fault-tolerant control methods

容错控制策略	优点	缺点
设置冗余模块控制策略	控制方法简单易行	①增加系统成本 ②造成资源浪费 ③具有较强局限性
对称切除控制策略	①控制方法简单易行 ②有效提升电能质量	①降低系统电平和容量 ②增加系统成本
非对称切除控制策略	①控制效果良好 ②控制方法成本较低	控制算法复杂

5 结论

在全球能源问题日益突出的大背景下,近年来储能产业发展迅速,特别是电网侧的储能需求增速明显,且锂电池储能装机规模最大,因此,如何使级联型储能PCS做到大容量、高效率、稳定运行是目前研究热点。本文对现有的级联型储能PCS控制策略进行了分析、归纳与总结,根据级联型储能PCS控制策略研究现状和存在问题,可以从以下几个方面对级联型储能PCS进行进一步改进与研究:

1)为提高级联型储能PCS效率,可采用新型碳化硅作为功率开关器件以降低开关损耗。

2)储能系统均衡控制需要实时检测电池信息并对差异快速响应,使电池在短时间内达到均衡,尽量较少参数设置,在增加储能系统有效容量的同时提高输出电能质量。

3)目前对容错控制的研究大多只停留在理论分析和仿真阶段,在快速检测故障模块和保证系统SOC均衡方面的研究还有待进一步深入,仍需对其进行大量的工程验证。

参考文献

- [1] 凌志斌,黄中,田凯.大容量电池储能系统技术现状与发展[J].供用电,2018,35(9):3-8,21.
- [2] 常丰祺,李永东,郑泽东.新型电池储能拓扑的并网策略研究[J].电气传动,2013(S1):98-102.
- [3] 李战鹰.大容量电池储能系统PCS拓扑结构研究[J].南方电网技术,2010,4(5):39-42.
- [4] Guo Haifeng, Chen Man, Cao Yang, et al. Design of 2 MW/10 kV cascaded H-bridge power conversion system[C]//2014 International Conference on Power System Technology, 2014.
- [5] Hirofumi A. A review of developments in the family of modular multilevel cascade converters[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018,13(4):1222-1235.
- [6] 蔡旭,李睿.大型电池储能PCS的现状与发展[J].电器与能效管理技术,2016(14):1-8,40.
- [7] Malinowski M, Gopakumar K, Rodriguez J, et al. A survey on cascaded multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010,57(7):2197-2206.
- [8] 杨晓冬.级联型STATCOM故障诊断与容错控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [9] Wan C, Yang G, Wu W, et al. An active and reactive power regulating system based on a cascaded-converter[C]//IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2010.
- [10] Maharjan L, Inoue S, Akagi H, et al. A transformerless battery energy storage system based on a multilevel cascade PWM converter[C]// Power Electronics Specialists Conference, 2008.
- [11] 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.
- [12] 伏祥运,王建曠,纪延超,等.静止坐标系下D-STATCOM自适应无差拍控制[J].电力系统自动化,2007,31(8):41-45.
- [13] 徐榕,于泳,于雁南,等.基于离散状态观测器的H桥级联STATCOM无差拍控制[J].电力系统自动化,2014(21):58-65.
- [14] 张永昌,谢伟,李正熙.PWM整流器预测无差拍直接功率控制[J].电机与控制学报,2013,17(12):57-63.
- [15] Cortes P, Rodriguez J, Silva C, et al. Delay compensation in model predictive current control of a three-phase inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012,59(2):1323-1325.
- [16] Hu J, Zhu Z Q. Improved voltage-vector sequences on dead-

- beat predictive direct power control of reversible three-phase grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1):254-267.
- [17] 邱东强,涂亚庆.神经网络控制的现状与展望[J].自动化与仪器仪表,2001(5):1-7.
- [18] 徐德鸿,封伟,王毅,等. PWM逆变器的一种神经网络控制方法[J]. 电力电子技术,1998(4):82-85.
- [19] 郭鹏.模糊前馈与模糊PID结合的风力发电机组变桨距控制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(8):123-128.
- [20] 贾要勤,朱明琳,凤勇.基于状态反馈的单相电压型逆变器重复控制[J]. 电工技术学报,2014,29(6):57-63.
- [21] 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.
- [22] 郭尧.具有均衡控制功能的电池组管理模块研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [23] Zuhair A, Wang C H, Jiang C J, *et al.* Improved cascaded multilevel battery inverters with phase-to-phase SOC balancing capability[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2017.
- [24] 冯宇鹏,王先为,吴金龙,等.基于负序电流前馈的星型链式STATCOM链间均压策略[J]. 电网技术,2016,40(5):1502-1508.
- [25] Hatano N, Ise T. Control scheme of cascaded H-bridge STATCOM using zero-sequence voltage and negative-sequence current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2):543-550.
- [26] 季振东,赵剑锋,孙毅超,等.零序和负序电压注入的级联型并网逆变器直流侧电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):9-17.
- [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):68-82.
- [28] 申科,王建勋,班明飞,等.基于阶梯波调制的MMC电容电压平衡控制方法对比研究[J]. 电机与控制学报,2016,20(10):1-8.
- [29] Angulo M, Lezana P, Kouro S, *et al.* Level-shifted PWM for cascaded multilevel inverters with even power distribution[C]//2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007.
- [30] 陈强.高压直挂大容量电池储能功率转换系统[D].上海:上海交通大学,2017.
- [31] 陈强,张鲁华,吴延俊,等.储能型MMC换流器的SOC均衡策略研究[J]. 电测与仪表,2020,57(5):37-43.
- [32] 陈丽,蔡红军,唐圣学.级联型多电平变频器容错策略及结构优化研究[J]. 电力电子技术,2017(6):72-75,79.
- [33] Mirafzal, Behrooz. Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10):5192-5202.
- [34] 徐帅,张建忠.多电平电压源型逆变器的容错技术综述[J]. 电工技术学报,2015,30(21):39-50.
- [35] 汪玉凤,张影,李爽,等.多电平级联H桥逆变器3N+1冗余容错策略的研究[J]. 高压电器,2018,54(2):208-212.
- [36] Song W, Huang A Q. Fault-tolerant design and control strategy for cascaded H-bridge multilevel converter-based STATCOM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8):2700-2708.
- [37] Maharjan L, Yamagishi T, Akagi H, *et al.* Fault-tolerant operation of a battery-energy-storage system based on a multilevel cascade PWM converter with star configuration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9):2386-2396.
- [38] Rodriguez J, Hammond P W, Pontt J, *et al.* Operation of a medium-voltage drive under faulty conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4):1080-1085.
- [39] Hammond P W. Enhancing the reliability of modular medium-voltage drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(5):948-954.
- [40] Lezana P, Ortiz G. Extended operation of cascade multicell converters under fault condition.[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7):2697-2703.

收稿日期:2019-09-24

修改稿日期:2019-11-01