

电网不平衡工况下链式储能变流器SOC 均衡控制方法研究

李志鹏¹, 李嘉豪², 王军¹, 郑毅¹, 王丽¹, 何英杰²

(1. 河南许继仪表有限公司, 河南 许昌 461000;
2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:在电网电压不平衡工况下,链式储能变流器三相之间会产生有功功率偏差,进而会使得三相荷电状态(SOC)失衡,最终会降低容量利用率和系统可靠性。针对该问题提出了一种负序电流和零序电压混合注入的控制策略,当单独采用零序电压注入无法实现相间SOC均衡时,剩余的功率偏差可以通过负序电流注入来均衡,这样既避免了所需注入零序电压过高导致输出电压畸变的问题,相较于单独负序电流注入,也减小了流向电网的负序电流,该控制策略兼顾了相间SOC均衡能力及变流器输出电能质量。最后通过仿真验证了该均衡控制方案的有效性。

关键词:链式储能变流器;负序电流注入;零序电压注入;荷电状态

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26630

Research on SOC Balancing Control Method for Cascaded Energy Storage Converters Under Grid Unbalanced Conditions

LI Zhipeng¹, LI Jiahao², WANG Jun¹, ZHENG Yi¹, WANG Li¹, HE Yingjie²

(1. XJ Metering Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Under grid voltage unbalance conditions, active power deviations occur between the three phases of the cascaded energy storage converter, leading to unbalanced three-phase state of charge (SOC) and ultimately reducing capacity utilization and system reliability. To address this issue, a control strategy based on the hybrid injection of negative-sequence current and zero-sequence voltage was proposed. When zero-sequence voltage injection alone cannot achieve SOC balance, the remaining power deviation was balanced through negative-sequence current injection. This approach avoids the issue of excessive zero-sequence voltage injection causing output voltage distortion, and compares to using negative-sequence current injection alone, it also reduces the negative-sequence current flowing into the grid. This control strategy balances both phase-to-phase SOC balancing capability and the output power quality of the converter. Finally, the effectiveness of this approach was verified through simulation.

Key words: cascaded energy storage converters; negative-sequence current injection; zero-sequence voltage injection; state of charge (SOC)

随着以风电、光电为代表的新能源的快速发展,其较大的间歇性、波动性和随机性显著影响了电网稳定性。为了避免弃风弃光情况的发生,提高系统稳定性,应用储能装置可实现新能源输出与用电需求的平衡^[1-5]。电池储能技术是目前应用最广泛的储能技术之一^[6-9],其中基于H桥模

块级联的链式储能变流器凭借易于模块化扩展、响应速度快、谐波含量低、各逆变单元独立、无需多重变压器接入以及在输出相同电平下所需开关器件少等优势在电池储能领域得到了广泛应用^[10-12]。

在电网电压不平衡时,链式储能变流器三相

作者简介:李志鹏(1985—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为新能源接入与控制,Email:583812766@qq.com

通讯作者:何英杰(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为电能质量控制技术,Email:yjhe@mail.xjtu.edu.cn

储能电池的充放电功率不同^[13],会导致某相提前充满电或放完电,存在“短板效应”,为了避免储能电池的过充或过放,提高储能系统容量利用率及可靠性,需要进行不同相储能电池之间的SOC均衡。

目前对于链式储能系统,SOC均衡控制方法主要分为硬件均衡方法和软件均衡方法。硬件均衡控制方法需要通过附加均衡电路^[14],增加了系统的成本和体积,并且也提高了系统控制的复杂度,目前应用较少。对于软件均衡控制方法,文献[15]针对角接链式储能变流器提出采用零序环流实现相间SOC均衡控制,相内通过调整输出电压来实现相内各单元的有功功率重新分配。文献[16]针对星接链式储能变流器提出采用零序电压注入来实现相间SOC均衡控制,相内通过在各单元上叠加交流电压信号实现相内SOC均衡控制。文献[17]提出通过注入无功电流来实现相内的SOC均衡控制,即重新分配相内各储能模块的有功功率和无功功率,但未考虑相间SOC均衡控制。文献[18]指出了负序电流注入相较于零序电压注入的方法具有较强的功率均衡能力,提出了采用负序电流注入和零序电压注入控制方法进行切换以实现相间SOC均衡控制。当链式储能系统工作于轻微不平衡工况下,采用零序电压注入的控制方法,当工作于严重不平衡工况时,采用负序电流注入的控制方法,但该方法在严重不平衡电网及补偿不平衡负载工况下,通过单独注入负序电流的方式会进一步恶化电网,对电网电能质量产生影响,尤其是对于弱电网。

基于零序电压注入的方法不会对电网产生影响,但该方法有功功率均衡能力较弱,在严重不平衡工况下所需注入的零序电压过高,影响系统输出,基于负序电流注入的方法有功功率均衡能力强,但会影响电网的电能质量,因此本文针对星接链式储能变流器运行于电网电压不平衡工况下提出了一种零序电压和负序电流混合注入的相间SOC均衡控制方法,该方法结合了负序电流有功功率均衡能力强及零序电压不会对电网产生影响的优势,避免了过高零序电压注入对链式储能系统功率输出的影响。最后本文通过仿真验证了该注入方案的可行性。

1 链式储能变流器系统结构

星接链式储能变流器^[19]主电路结构如图1所

示,每相由 N 个H桥模块串联构成,直流侧经过滤波电抗器与储能电池连接,交流侧经滤波电抗器与电网相连。

图1中 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 分别为三相电网电压; i_{ca} 、 i_{cb} 和 i_{cc} 分别为链式储能变流器三相输出电流, L_i ($i=a,b,c$)为链式储能变流器与电网连接时的进线电感; L 和 C_{dc} 分别为各个H桥模块滤波电感值和直流侧电容值。

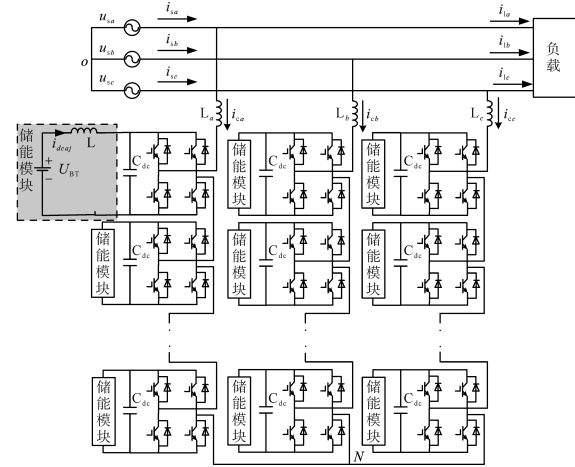


图1 链式储能变流器主电路

Fig.1 Main circuit of cascaded energy storage converter

如图2所示为星接链式储能变流器系统控制框图,主要分为SOC均衡控制^[20]和电流控制。其中SOC均衡控制主要包含两层结构,第1层为相间SOC均衡控制,主要是通过注入负序电流或零序电压以重新分配三相有功功率来实现,图2所展示的是通过零序电压注入方法;第2层为相内各模块SOC均衡控制,一般通过沿输出电流方向微调每相各个模块输出电压,使各个H桥模块功率重新分配,以实现相内各模块的SOC均衡。电流环正序无功电流参考值 i_{dq}^* 采用基于瞬时无功功率理论的无功检测法获取, i_{cd}^* 为电流环正序有功电流参考值,在控制环路中采用 dq 状态解耦PI

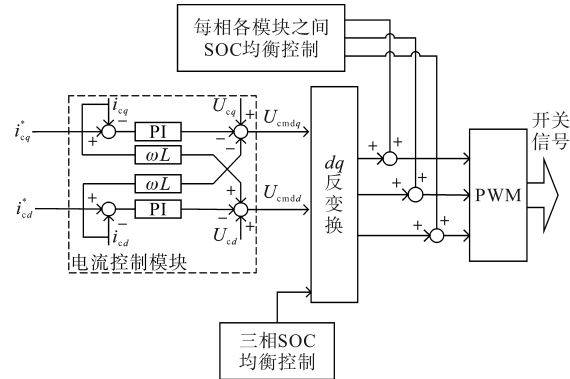


图2 系统总控制框图

Fig.2 The block diagram of the total control system

控制方法。

2 链式储能变流器功率分析

电网电压不平衡时包含负序分量,定义并网电压为

$$\begin{cases} u_{sa} = \sqrt{2} U_p \sin(\omega t) + \sqrt{2} U_n \sin(\omega t + \varphi) \\ u_{sb} = \sqrt{2} U_p \sin(\omega t - 120^\circ) + \sqrt{2} U_n \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) \\ u_{sc} = \sqrt{2} U_p \sin(\omega t + 120^\circ) + \sqrt{2} U_n \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_p 为正序电压有效值; U_n 为负序电压有效值; φ 为负序电压初相位。

定义链式储能变流器输出电流为

$$\begin{cases} i_{cap} = \sqrt{2} I_p \sin(\omega t + \gamma) \\ i_{cbp} = \sqrt{2} I_p \sin(\omega t + \gamma - 120^\circ) \\ i_{ccp} = \sqrt{2} I_p \sin(\omega t + \gamma + 120^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_p 为链式储能变流器正序输出电流有效值; γ 为输出电流相位。

这时电网各相的功率 $p_{si}(i=a,b,c)$ 分别为

$$\begin{cases} p_{sa} = U_p I_p \cos \gamma - U_p I_p \cos(2\omega t + \gamma) + \\ \quad U_n I_p \cos(\varphi - \gamma) - U_n I_p \cos(2\omega t + \varphi + \gamma) \\ p_{sb} = U_p I_p \cos \gamma - U_p I_p \cos(2\omega t + \gamma + 120^\circ) + \\ \quad U_n I_p \cos(\varphi - \gamma - 120^\circ) - U_n I_p \cos(2\omega t + \varphi + \gamma) \\ p_{sc} = U_p I_p \cos \gamma - U_p I_p \cos(2\omega t + \gamma - 120^\circ) + \\ \quad U_n I_p \cos(\varphi - \gamma + 120^\circ) - U_n I_p \cos(2\omega t + \varphi + \gamma) \end{cases} \quad (3)$$

链式储能变流器各相吸收的功率分别为

$$\begin{cases} p_a = p_{sa} - i_{ca} L \frac{di_{ca}}{dt} \\ p_b = p_{sb} - i_{cb} L \frac{di_{cb}}{dt} \\ p_c = p_{sc} - i_{cc} L \frac{di_{cc}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

这时链式储能变流器每相每个电网周期内吸收的平均功率分别为

$$\begin{cases} P_{ap} = U_p I_p \cos \gamma + U_n I_p \cos(\gamma - \varphi) \\ P_{bp} = U_p I_p \cos \gamma + U_n I_p \cos(\gamma - \varphi + 120^\circ) \\ P_{cp} = U_p I_p \cos \gamma + U_n I_p \cos(\gamma - \varphi - 120^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

链式储能系统每相支路吸收有功功率的偏差量分别为

$$\begin{cases} \Delta P_{ap} = U_n I_p \cos(\gamma - \varphi) \\ \Delta P_{bp} = U_n I_p \cos(\gamma - \varphi + 120^\circ) \\ \Delta P_{cp} = U_n I_p \cos(\gamma - \varphi - 120^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)可知三相功率偏差之和为零,电网负序电压分量与链式储能正序输出电流作用只会引起三相支路之间有功功率的转移,进而引起三相SOC不平衡,导致短板效应的产生,但并不会影响链式储能系统与电网系统之间总的有功功率交换。

假设链式储能变流器注入的零序电压为

$$u_0 = \sqrt{2} U_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (7)$$

式中: U_0 为零序电压有效值; δ 为零序电压的初相位。

这时零序电压注入所产生的三相瞬时功率如下式所示:

$$\begin{cases} p_{a0} = U_0 I_p \cos(\delta - \gamma) - U_0 I_p \cos(2\omega t + \delta + \gamma) \\ p_{b0} = U_0 I_p \cos(\delta - \gamma + 120^\circ) - \\ \quad U_0 I_p \cos(2\omega t + \delta + \gamma - 120^\circ) \\ p_{c0} = U_0 I_p \cos(\delta - \gamma - 120^\circ) - \\ \quad U_0 I_p \cos(2\omega t + \delta + \gamma + 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

注入零序电压在每相支路每个电网周期内所产生的平均功率分别为

$$\begin{cases} P_{a0} = U_0 I_p \cos(\delta - \gamma) \\ P_{b0} = U_0 I_p \cos(\delta - \gamma + 120^\circ) \\ P_{c0} = U_0 I_p \cos(\delta - \gamma - 120^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)可知,零序电压注入与链式储能正序输出电流作用同样只会引起三相支路之间有功功率的转移,因此可以寻找合适的零序电压以补偿电网负序电压分量与链式储能正序输出电流作用所产生的功率偏差。

忽略链式储能装置损耗,链式储能系统三相支路有功功率应为零,即

$$\begin{cases} \Delta P_{ap} + P_{a0} = 0 \\ \Delta P_{bp} + P_{b0} = 0 \\ \Delta P_{cp} + P_{c0} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据上述条件,可以求得所需注入的零序电压为

$$u_0 = \sqrt{2} U_n \sin(\omega t + 2\gamma - \varphi + \pi) \quad (11)$$

当单独采用负序电流注入方法时,定义链式储能变流器注入的负序电流为

$$\begin{cases} i_{can} = \sqrt{2} I_n \sin(\omega t + \phi) \\ i_{cbl} = \sqrt{2} I_n \sin(\omega t + \phi + 120^\circ) \\ i_{cen} = \sqrt{2} I_n \sin(\omega t + \phi - 120^\circ) \end{cases} \quad (12)$$

这时由于负序电流注入所产生的平均功率如下式所示:

$$\begin{cases} P_{an} = P_{an0} + \Delta P_{an} \\ = U_p I_n \cos \phi + U_n I_n \cos(\varphi - \phi) \\ P_{bn} = P_{bn0} + \Delta P_{bn} \\ = U_p I_n \cos(\phi - 120^\circ) + U_n I_n \cos(\varphi - \phi) \\ P_{cn} = P_{cn0} + \Delta P_{cn} \\ = U_p I_n \cos(\phi + 120^\circ) + U_n I_n \cos(\varphi - \phi) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{jn0}(j=a,b,c)$ 为三相相同的有功功率分量; $\Delta P_{jn}(j=a,b,c)$ 为三相有功功率偏差。

根据式(13)可知,注入负序电流可以实现三相有功功率的转移,进而实现相间SOC均衡控制,但负序电流注入会影响链式储能系统与电网系统之间的有功功率交换,降低了链式储能系统容量的有效利用率。

要想实现三相有功功率均衡要保证注入的负序电流满足以下条件:

$$\begin{cases} \Delta P_{an} + \Delta P_a = 0 \\ \Delta P_{bn} + \Delta P_b = 0 \\ \Delta P_{cn} + \Delta P_c = 0 \end{cases} \quad (14)$$

因此计算所需注入的负序电流需要获知所需均衡的有功功率偏差,还需要电网电压正序分量的幅值和相角以计算注入负序电流所产生的有功功率偏差,进而与所需均衡的有功功率偏差进行抵消,实现三相有功功率的均衡,避免产生SOC偏差。基于式(6)所示的三相有功功率偏差,所需注入的三相负序电流根据式(14)可以计算得到:

$$\begin{cases} i_{can} = \sqrt{2} \frac{U_n I_p}{U_p} \sin(\omega t - \gamma + \varphi + \pi) \\ i_{cbl} = \sqrt{2} \frac{U_n I_p}{U_p} \sin(\omega t - \gamma + \varphi + \pi + 120^\circ) \\ i_{cen} = \sqrt{2} \frac{U_n I_p}{U_p} \sin(\omega t - \gamma + \varphi + \pi - 120^\circ) \end{cases} \quad (15)$$

通过上述分析,通过零序电压注入方式实现相间SOC均衡对系统容量和电网系统的影响是最小的,因此需要优先采用零序电压注入。

3 零序电压和负序电流混合注入

根据所需注入的零序电压表达式可以看出,随着并网点负序电压的增加,注入的零序电压幅值也会增大,这时候会显著增大输出电压幅值,限制了链式储能装置的功率输出。

为了避免零序电压注入导致系统过调制限制系统输出,于是本文提出了零序电压与负序电流混合注入的方式实现链式储能变流器三相SOC均衡控制。当采用零序电压注入方法,交流侧输出电压超过直流侧额定电压时,这时需要减小零序电压注入,引入衰减系数 k ,即保持零序电压的相位不变,减小零序电压幅值,保证在叠加零序电压后三相输出电压均在有效调制范围之内,这时剩余的有功功率偏差通过负序电流注入来均衡,负序电流注入控制方法如图3所示,实际系统所需均衡的有功功率偏差根据相间SOC偏差通过PI控制器获得,得到有功功率偏差 $\Delta P_j(j=a,b,c)$ 后,基于式(14)计算所需要注入的负序电流值。

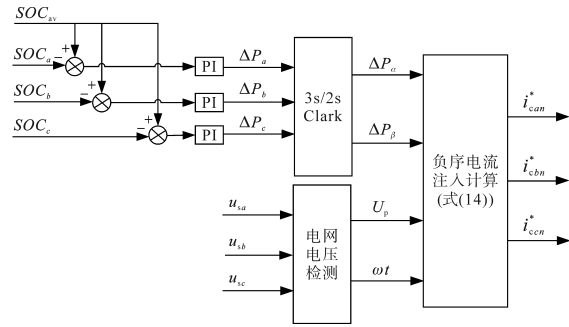


图3 负序电流注入控制示意图

Fig.3 Diagram of negative-sequence current injection control

此时零序电压注入表达式为

$$u_0 = k \sqrt{2} U_n \sin(\omega t + 2\gamma - \varphi + \pi) \quad (16)$$

基于零序电压和负序电流混合注入的总控制框图如图4所示,其中负序电流注入是通过闭环控制实现的,零序电压注入是基于式(16)通过计算开环控制实现的,当电网电压不平衡时,该控制方案可以根据电网电压信息快速注入零序电压。

此时系统输出电流指令为正序电流($i_{cap}^*, i_{cbp}^*, i_{ccp}^*$)以及用于相间均衡的负序电流($i_{can}^*, i_{cbl}^*, i_{cen}^*$)之和。

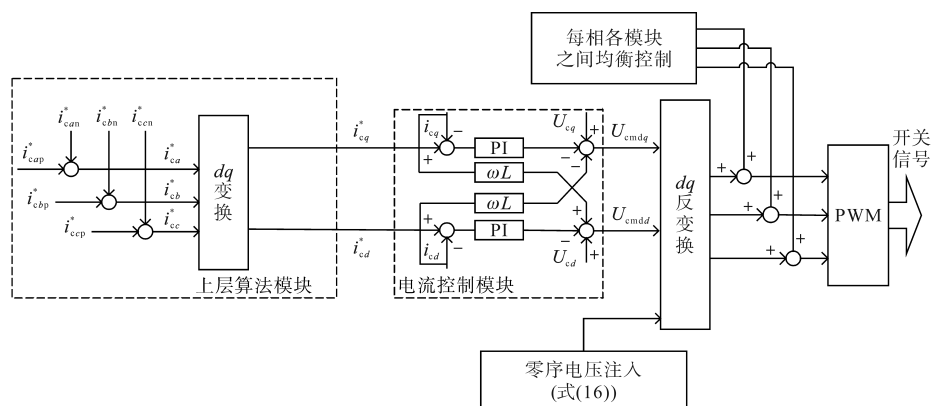


图4 系统总控制框图

Fig.4 The block diagram of the total control system

4 仿真分析

为了验证本文所提链式储能变流器相间SOC均衡控制方法的可行性,在Matlab/Simulink仿真软件中搭建了仿真模型,参数如表1所示。

表1 仿真参数表

Tab.1 Table of simulation parameters

序号	参数	数值
1	电网线电压/kV	10
2	电网频率/Hz	50
3	各相级联模块数	12
4	直流侧母线电容/mF	20
5	直流侧滤波电感/mH	2
6	交流侧滤波电抗/mH	4
7	电池簇额定电压/V	800
8	电流环比例控制参数	1 000
9	电流环积分控制参数	50 000
10	负序电流注入比例控制参数	100 000
11	负序电流注入积分控制参数	100 000
12	零序电压衰减系数	0.6

4.1 稳态分析

定义电网电压不平衡度为

$$k_v = U_n / U_p \quad (17)$$

这里以电网电压不平衡度为0.4进行仿真分析。图5为未加相间SOC均衡控制方法的仿真结果,图6为单独零序电压注入控制方法的仿真结果,图7为单独负序电流注入控制方法的仿真结果,图8为本文所提出的零序电压和负序电流混合注入的仿真结果。

根据图5c可知,当不采用任何相间SOC均衡控制方法时,在不平衡电网电压工况下,由于三相有功功率不同,随着三相有功功率偏差量在时间上的累积,三相SOC之间产生了明显的偏差。

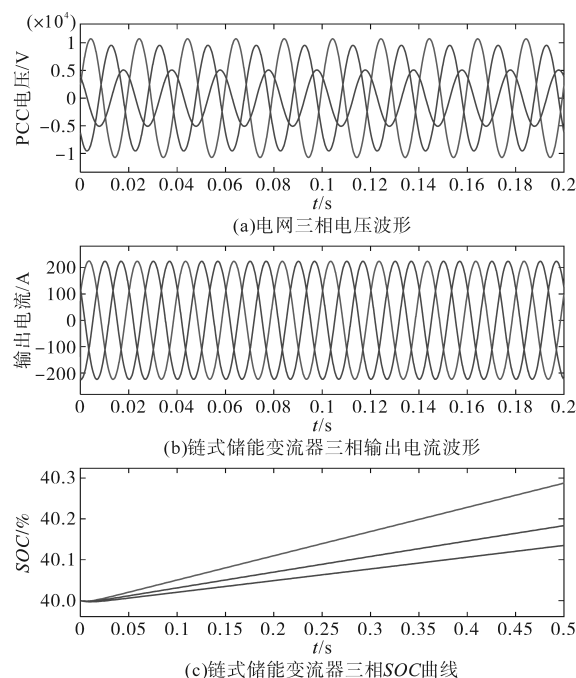


图5 未加相间SOC均衡控制方法的仿真结果

Fig.5 Simulation results without SOC balancing control method

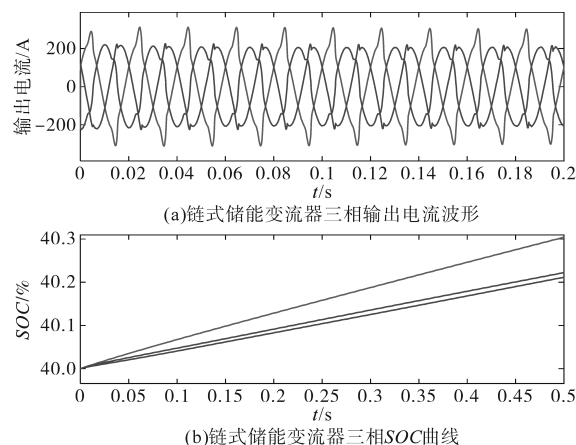


图6 基于零序电压注入控制方法的仿真结果

Fig.6 Simulation results based on zero sequence voltage injection control method

当采用单独零序电压注入均衡控制方法时,由于电网不平衡度较大,需要注入较高的零序电压,导致系统发生了过调制,引起输出电流畸变,如图6a所示,对电网造成了谐波污染,由于无法输出所需的零序电压,此时也无法完全均衡三相有功功率,随着有功功率偏差在时间上的累积,最终会使得三相SOC产生显著偏差,如图6b所示,影响了储能设备容量的利用率。

当采用单独负序电流注入时,由于负序电流

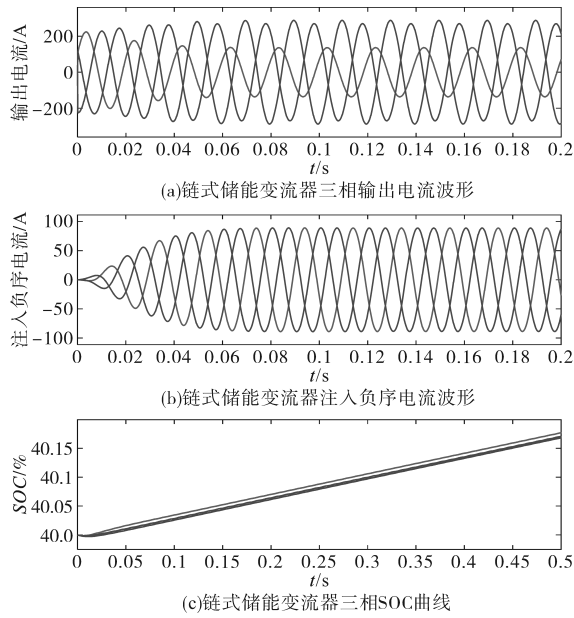


图7 基于负序电流注入控制方法的仿真结果

Fig.7 Simulation results based on negative sequence current injection control method

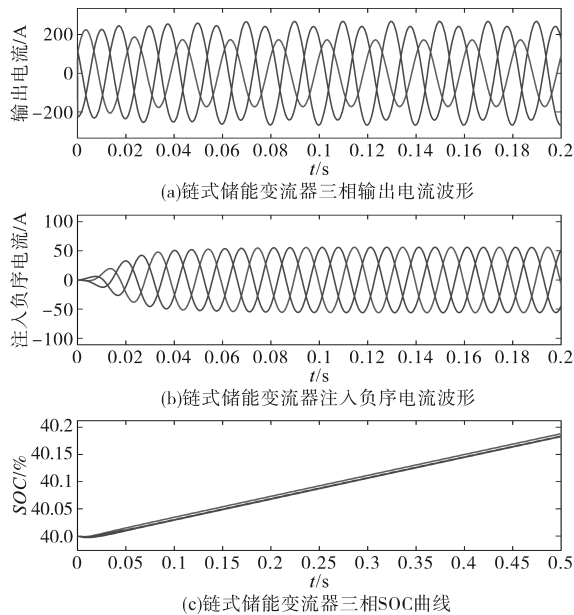


图8 基于零序电压和负序电流混合注入控制方法的仿真结果
Fig.8 Simulation results based on hybrid injection control method of zero sequence voltage and negative sequence current

的功率均衡能力较强,可以降低储能变流器三相输出电压,避免过调制问题发生,有效实现了相间SOC均衡控制,如图7c所示,此时输出电流中虽然没有谐波分量,但会存在一定负序分量,系统稳定时注入负序电流幅值约为90 A。

基于负序电流和零序电压混合注入的均衡方法同样可以避免过调制问题,并减轻了负序电流注入对电网的污染。根据图8所示的仿真结果可以得知,在系统稳定时该方法注入的负序电流幅值约为55 A,显著降低了负序电流的输出,并且有效地实现了三相有功功率的均衡,避免了由于有功功率偏差导致的三相SOC偏差。

4.2 动态分析

在0.5 s时并网网产生不平衡电压,仿真结果如图9所示。定义三相SOC相较于三相平均SOC

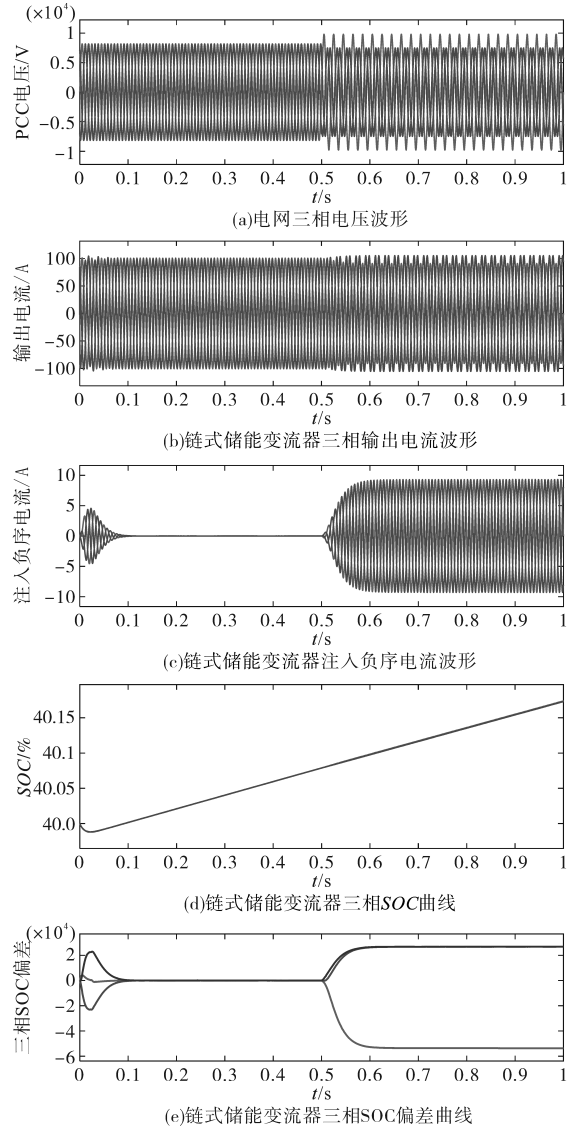


图9 动态仿真结果

Fig.9 Dynamic simulation results

的差值为三相SOC偏差,定义从动态事件发生到三相SOC稳定为系统调节时间,根据图9e所示的三相SOC偏差曲线可以看出,三相SOC偏差最大值约为0.000 53%,系统的调节时间约为0.08 s左右,可见在并网点电压发生不平衡突变时,三相有功功率得到了快速均衡,并未引起相间SOC明显偏差,证明本文所提方法具有较快的动态响应速度。

5 结论

在电网电压严重不平衡工况下,星接链式储能变流器无法单独通过零序电压注入实现三相有功功率均衡控制,使得相间SOC产生显著偏差,本文提出了通过零序电压和负序电流混合注入的相间有功功率均衡控制方案,实现相间SOC均衡控制,其中零序电压注入通过开环计算控制实现,实现一部分有功功率偏差的均衡,负序电流注入通过闭环控制实现,用于均衡剩余的有功功率偏差,该方案结合了负序电流有功功率均衡能力强及零序电压不会对电网产生影响的优势,通过仿真验证了该方案具有良好的控制效果及动态性能。

参考文献

- [1] YAO L, YANG B, CUI H, et al. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 519-528.
- [2] 王承民,孙伟卿,衣涛,等.智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J].中国电机工程学报,2013,33(7): 33-41, 21.
WANG Chengmin, SUN Weiqing, YI Tao, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41, 21.
- [3] 方强,程志江,杨涵棣.基于改进型一致性算法的储能SOC均衡控制方法[J].电气传动,2023,53(6): 70-77.
FANG Qiang, CHENG Zhijiang, YANG Handi. Energy storage SOC equalization control method based on improved consistency algorithm[J]. Electric Drive, 2023, 53(6): 70-77.
- [4] 姜海洋,杜尔顺,朱桂萍,等.面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(19): 194-207.
JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 194-207.
- [5] 杨锡运,任杰,李相俊,等.储能系统平滑光伏电站功率波动的变参数斜率控制方法[J].电力系统自动化,2016,40(24): 56-63.
YANG Xiyun, REN Jie, LI Xiangjun, et al. Slope control method with variable coefficients of battery energy storage system for smoothing photovoltaic power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 56-63.
- [6] 李逢兵,谢开贵,张雪松,等.基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略设计[J].电力系统自动化,2013,37(1): 70-75.
LI Fengbing, XIE Kaigui, ZHANG Xuesong, et al. Control strategy design for hybrid energy storage system based on charge/discharge status of lithium-ion battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 70-75.
- [7] 曹鹏程,李培强,孙培栋,等.电池储能提高电网薄弱节点电压稳定性的研究[J].电气传动,2021,51(24): 67-74.
CAO Pengcheng, LI Peiqiang, SUN Peidong, et al. Study on battery energy storage to improve voltage stability of weak nodes in power grid[J]. Electric Drive, 2021, 51(24): 67-74.
- [8] DEEBA S R, SHARMA R, SAHA T K, et al. Evaluation of technical and financial benefits of battery-based energy storage systems in distribution networks[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8): 1149-1160.
- [9] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等.新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(1): 158-169.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169.
- [10] 李勇琦,陈满,伍科,等.H桥级联电池储能系统四级均衡控制研究[J].太阳能学报,2019,40(5): 1291-1297.
LI Yongqi, CHEN Man, WU Ke, et al. Research on four levels balancing control for cascaded h-bridge based battery energy storage system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(5): 1291-1297.
- [11] XU B, TU H, DU Y, et al. A distributed control architecture for cascaded H-bridge converter with integrated battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 845-856.
- [12] 郭海峰,陈满,晁刚,等.H桥级联型储能功率转换系统(PCS)相内均衡控制策略研究[J].太阳能学报,2014,35(8): 1405-1410.
GUO Haifeng, CHEN Man, CHAO Gang, et al. Research of balancing control strategy in internal phase of storage energy power conversion system based on h bridge multilevel cascade[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(8): 1405-1410.
- [13] 马灿,夏玲芳,高瑞峰,等.电网不平衡下星形级联STATCOM负序电压控制[J].电力电子技术,2020,54(5): 14-18.
MA Can, XIA Lingfang, GAO Ruifeng, et al. Negative sequence voltage control under unbalanced grid for star-connected cascaded STATCOM[J]. Power Electronics, 2020, 54(5): 14-18.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 李京泽.级联H桥储能变换器控制策略研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
LI Jingze. Research on the control strategies of cascaded H-bridge energy storage converter[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [19] 刘樊明,陈才学,李映,等.中压并联型DVR链式变流器主电路及参数设计[J].电力电子技术,2024,58(3):15-19.
LIU Fanning, CHEN Caixue, LI Ying. Main Circuit and parameter design of medium voltage parallel type DVR chain converter [J]. Power Electronics, 2024, 58(3): 15-19.
- [20] 李锦,潘传鹏,李振坤,等.基于虚拟额定电流的储能SOC自适应均衡策略[J].电力电子技术,2024,58(12):18-22.
LI Jin, PAN Chuanpeng, LI Zhenkun, et al. Adaptive equalization strategy for energy storage SOC based on virtual rated current[J]. Power Electronics, 2024, 58(12): 18-22.

收稿日期:2025-05-19

修改稿日期:2025-07-28