光储系统直流母线电压与超级电容荷电管理控制

刘海涛^{1,2},马丙泰^{1†},郝思鹏^{1,2},黄 铖¹,张匡翼¹

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167)

摘要:光储并网系统中,针对电压源型换流器(VSC)中外环直流母线电压无静差控制,提出改进型PI控制方法. 根据超级电容荷电状态(SOC_{sc})提出基于交互控制及限值管理混合储能系统二次功率分配控制策略.临界充放电模 式下,引入虚拟修正电流的概念,根据超级电容分配功率的正负及交互速率因子确定虚拟修正电流的大小, 使SOC_{sc}向稳定的区间变化;极限充放电模式下,对SOC_{sc}进行限制管理,避免其过充过放现象.通过算例分析,验证 了所提改进型PI控制策略的优越性;并基于获得的SOC_{sc}进行二次功率分配,控制其荷电状态(SOC)运行于相对稳 定工作区间.

关键词: 改进型PI控制; 二次功率分配; 虚拟修正电流; 限值管理

引用格式:刘海涛,马丙泰,郝思鹏,等.光储系统直流母线电压与超级电容荷电管理控制.控制理论与应用, 2022, 39(9):1661-1669

DOI: 10.7641/CTA.2022.10831

DC bus voltage and super capacitor charge management control in optical storage system

LIU Hai-tao^{1,2}, MA Bing-tai^{1†}, HAO Si-peng^{1,2}, HUANG Cheng¹, ZHANG Kuang-yi¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu 211167, China;

2. Jiangsu Distribution Network Intelligent Technology and Equipment Collaborative Innovation Center, Nanjing Jiangsu 211167, China)

Abstract: In optical storage grid connected system, an improved PI control method is proposed to control the outer loop DC bus voltage of voltage source converter (VSC). According to the super capacitor state of charge (SOC_{sc}), the secondary power distribution control strategy based on interactive control and limit management is proposed. Under the critical charge and discharge mode, the concept of virtual correction current is introduced, and the size of the current value is determined through the positive and negative distribution power of the super capacitor and the interaction rate factor, so as to change the SOC_{sc} in a stable range. Under the limit charge and discharge mode, SOC_{sc} shall be limited and managed to avoid overcharge and discharge. Through the example analysis, the superiority of the proposed improved PI control strategy is verified. Based on the obtained SOC_{sc} , the secondary power is distributed to control its state of charge (SOC) to operate in a relatively stable working range.

Key words: improved PI control; secondary power distribution; virtual correction current; limit management

Citation: LIU Haitao, MA Bingtai, HAO Sipeng, et al. DC bus voltage and super capacitor charge management control in optical storage system. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(9): 1661 – 1669

1 引言

近年来,风、光等新能源发电的快速发展,储能技术正以其灵活的功率调节能力和良好的可控性,展现出前所未有的发展前景^[1].蓄电池作为能量型储能代表,承担平抑波动功率的低频变化部分,适应其响应速度慢、长期稳定供电特点;超级电容作为功率型储能代表,承担平抑波动功率的高频快速变化部分,适

应其响应速度快、短时间内输出功率密度高的充放电 特点^[2]. 混合储能系统将两种类型储能结合使用,因 兼有能量密度大、功率密度高的双重属性而备受关注. 由于波动性和随机性,风光可再生能源的规模化并网, 对电网造成了较大的影响,而利用混合储能可提高可 再生能源的消纳及系统稳定性^[3-4].

针对光伏并网模型研究, 文献[5]提出了一种光伏

收稿日期: 2021-09-02; 录用日期: 2022-03-30.

[†]通信作者. E-mail: 3037309475@qq.com; Tel.: +86 15720807006.

本文责任编委:张承慧.

国家自然科学基金项目(51777197), 江苏省自然科学基金项目(18KJA470002)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51777197) and Natural Science Foundation Project of Jiangsu Province (18KJA470002).

(photovoltaic, PV)的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制和混合储能系统协调平 抑光伏并网功率波动策略. 电压源型换流器(voltage source converter, VSC)系统的稳定性是目前电力电子 化电力系统稳定性研究中最受关注、最具有实际应用 意义的重要问题之一[6]. 文献[7]讨论非隔离型光伏并 网逆变器的软开关实现技术的可行性和实现方法,为 下一代高功率密度非隔离型光伏并网逆变器打下基 础. 文献[8]通过对光伏-储能微电网系统中的功率变 换器的恒功率控制和直流母线电压无静差跟踪控制 策略进行协调、整合,有效维持了微电网系统的稳定 运行; VSC采用的电流内环和电压外环控制均通过比 例-积分(proportional integral, PI)调节器进行串联校 正,采用合适的方法设计PI调节器的参数,对于控制系 统的性能起着重要的作用.在直流母线电压无静差跟 踪控制中[9],常使用实测电压与参考电压的差值经传 统PI进行控制,以维持公共直流母线电压平稳.针对 传统PI控制参数整定较为困难,难以在复杂工况下保 持良好的控制性能^[10]; 文献[11-12]分别采用滑模PI 控制及深度学习模型控制,以提高直流母线电压稳态 精度与响应速度. 但滑模控制器的输出函数中控制参 数需要通过其他方式进行设置;深度学习神经网络需 要与确定策略梯度融合,算法控制过程复杂. 文献[13] 提出一种变论域模糊PI控制,根据输入误差的大小实 时调整模糊论域来得到更好的控制效果,但模糊控制 运行时间较长、效率不佳.

考虑到能量型与功率型储能各自承担功率分量的 特点, 文献[14-15]采用改进优化控制策略对混合储能 系统剩余功率(residual power of hybrid energy storage system, Phess)进行分配, 保持荷电状态(state of charge, SOC) 维持在合理范围内, 高效地平抑新能源功率波 动;但没有考虑超级电容充放电速度快,其SOC变化 迅速特点,容易存在过充过放问题.因此,考虑超级电 容荷电状态(super capacitor state of charge, SOCsc)的 混合储能功率再次分配问题得到学者广泛关注. 基于 变分模态分解-模糊控制策略以平抑风电功率波动, 保持SOC维持在合理范围,避免过充和过放的发 生[16]; 文献[17-18]分别采用变分模态分解与小波包 分解对Phess进行初级分配;其次,监测SOCsc并进行 混合储能二次功率分配,使储能元件工作在SOC安全 范围内,延长了储能元件的经济寿命.但变分模态分 解需要考虑分解模态数及二次罚函数因子的合理选 择;小波包分解所需数据量较多,计算工作量较大.文 献[19]提出了一种基于离散一致性算法的分布式储能 系统负荷功率分配分层控制策略;下层进行功率一次 分配,上层使用一致性算法产生电流修正量再次进行 功率控制,使得混合储能SOC运行于合理工作区间.

基于以上分析,针对光伏并网VSC系统中外环直流母线电压无静差控制常采用传统PI控制方式,直流母线电压稳定于参考电压偏差较大的问题;提出了改进PI控制方法,使公共直流母线电压更准确的平稳于参考值,并获得系统真实SOCsc.其次,提出了基于SOCsc的交互控制及限值管理的混合储能二次功率分配控制策略,优化SOCsc工作模式.通过搭建光储并网模型进行分析,表明改进型PI控制方法的优越性;同时在超级电容正常运行、临界充放电与极限放电3种运行区间下进行仿真,验证了所提控制策略的正确性和有效性.

2 光伏并网结构

本文搭建的典型光伏并网模型结构如图1所示,主 要包括光伏发电单元、大电网单元、VSC单元、交直 流负荷单元、蓄电池和超级电容构成的混合储能及其 控制系统单元.光伏模块通过单向DC/DC变换器与直 流母线相连;直流--交流母线间通过VSC连接;混合储 能单元通过双向DC/DC变换器与直流母线相连,实现 能量的双向流动;混合储能控制系统单元控制混合储 能系统,实现功率分配.

图1中: P_{pv} 表示光伏输出功率, P_{sys} 表示大电网输 出功率, P_{dc} 表示维持直流母线电压稳定所需功率, P_{LD} , P_{LS} 表示直流/交流负荷功率, P_{hess} 表示混合储能 系统剩余功率, $P_{b.ref}$, $P_{sc.ref}$ 表示蓄电池和超级电容承 担的功率.本文中混合储能承担的功率为负时表示充 电(充电电流为负), 功率为正时表示放电(放电电流为 正).剩余功率描述为: $P_{hess} = P_{LD} + P_{LS} + P_{dc} - P_{pv} - P_{sys} = P_{b.ref} + P_{sc.ref}$.

3 改进外环直流母线电压无静差控制

为提升有功和无功控制性能, VSC控制器通常采 用dq0坐标系下的双环控制结构^[9].外环控制器实现 直流电压、无功功率或交流电压控制,输出为内环电 流解耦控制器的目标电流值;内环采用直接电流矢量 控制.本文VSC外环采用简化恒功率控制和恒直流母 线电压恒无功功率控制^[20].图2表示传统PI控制下直 流母线电压无静差跟踪控制框图^[6,8], U_{dc}为直流母线 电压实际输出测量值, Udc. ref为直流母线电压设定参 考值. 基于模糊PI控制相关理论^[13], 对传统PI控制方 法进行改进. 为实现改进型PI控制, 使得 $U_e = U_{dc,ref}$ -Udc差值最小(即实现无误差跟踪),进而维持公共直流 母线电压更好稳定于参考值.以系统Udc与Udc ref的偏 差及偏差变化率为输入变量,该输入变量经函数 c_1 , c2控制,能够减小系统反馈的直流母线电压值与参考 值间的差值,并通过PI控制进行电压稳定跟踪;通过 函数 c_3 获得输出信号 $I_{d,ref}$,作为VSC电流内环控制输 入目标电流值,能够避免VSC中3相功率因数大幅度 震荡,维持系统稳定性.改进PI控制框图如图3所示.



图 1 光伏并网结构图

Fig. 1 Photovoltaic grid-connected structure



图 2 传统PI控制框图

Fig. 2 Traditional PI control block diagram



图 3 改进PI控制框图

Fig. 3 Improved PI control block diagram

通过函数*c*₁, *c*₂, *c*₃获得相应的控制系数*c*₁, *c*₂, *c*₃, 具体计算公式如式(1)所示.

$$\begin{cases} c_1 = \frac{6}{\max U - \min U}, \\ c_2 = \frac{6}{\max |U'| - \min |U'|}, \\ c_3 = \frac{U_{\text{dcmax}}}{6}, \end{cases}$$
(1)

其中: max U, min U表示 U_e 中的最大值与最小值; max|U'|, min|U'|表示 U_e 的一阶导数中绝对值的最大 值与最小值, U_{dcmax} 表示直流母线电压最大值.

4 基于交互控制及限值管理混合储能系统 功率分配策略

微电网中的功率波动可划分为高频与低频2种模式,其中低频波动功率幅值较大、变化缓慢、周期长,由蓄电池承担;高频波动功率幅值较小、周期短,由超级电容承担.混合储能系统只进行一次功率分配策略

虽然能够平抑分布式发电功率波动,但实际运行中超级电容容量配置相对较小,充放电速度快,且功率始终取决于蓄电池未补偿功率,易造成超级电容过充过放,不仅影响超级电容使用寿命,还有可能造成击穿等危险^[21].为解决该问题,本文提出基于SOC_{sc}的交互控制及限值管理混合储能系统二次功率分配控制策略.

4.1 超级电容SOC划分

为使储能单元能够有效运行,需要设置SOC正常 工作范围^[22].将SOC_{sc}进行划分,如图4所示.*a*₁和*b*₁ 是(极限)充放电警戒值;*a*,*b*是临界充放电警戒值.4个 警戒值将SOC_{sc}分为3种状态,即正常运行状态、临界 充放电状态和极限充放电状态.



Fig. 4 Super capacitor SOC division

4.2 功率分配控制策略

混合储能功率分配脉冲触发控制框图如图5所示. 系统P_{hess}经过低通滤波器(Low pass filter, LPF)进行 一次功率分配; I_{bat}, I_{sc}表示流过蓄电池、超级电容的 电流值, 电流间差值经过PI控制, 产生混合储能充放 电触发脉冲信号, 从而控制混合储能单元进行充放电. 低频功率分给蓄电池(P_{b_ref}),超级电容功率表示为 $P_{sc_ref} = P_{hess} - P_{b_ref}$.依据图4可以将混合储能系统 的控制分为如下3种工作运行区间:

1) 正常运行区间: $a \leq SOC_{sc} \leq b$.

在该区间内, SOC_{sc}处于图4正常运行状态, 混合储能进行正常功率分配, 维持系统稳定.

2) 临界充放电区间: $b < SOC_{sc} < b_1$ (临界充电) 或 $a_1 < SOC_{sc} < a$ (临界放电).



图 5 混合储能功率分配控制框图

Fig. 5 Power distribution control block diagram of hybrid energy storage

图5中, $I_{b.ref} = P_{b.ref}/U_{bat}$, $I_{sc.ref} = P_{sc.ref}/U_{sc}$ 为一 次功率分配蓄电池、超级电容的计算参考电流. 在临 界充放电情况下 $I_{b.ref} = I_{b.ref.1}$, $I_{sc.ref} = I_{sc.ref.1}$, $I_{sc.refn} = I_{sc.ref} + I_{vir}$, 表示在该充放电区间, 增加了虚拟修正电 流作用后二次功率分配的混合储能电流; 控制超级电 容充放电触发脉冲信号, 改变超级电容的功率交换量, 达到功率再分配的目的.

其中, 虚拟修正电流 Ivir 计算公式如式(2)所示.

$$I_{\text{vir}} = \begin{cases} -|K(\text{SOC}_{\text{sc}} - \text{SOC}_{\text{scref}})|, \\ a_1 \leq \text{SOC}_{\text{sc}} \leq a \boxplus P_{\text{sc.ref}} \geq 0, \\ 0, \ a_1 \leq \text{SOC}_{\text{sc}} \leq a \boxplus P_{\text{sc.ref}} < 0, \\ |K(\text{SOC}_{\text{sc}} - \text{SOC}_{\text{scref}})|, \\ b \leq \text{SOC}_{\text{sc}} \leq b_1 \boxplus P_{\text{sc.ref}} \leq 0, \\ 0, \ b \leq \text{SOC}_{\text{sc}} \leq b_1 \boxplus P_{\text{sc.ref}} > 0, \end{cases}$$
(2)

式中: K为交互速率因子, SOC_{scref}为超级电容荷电状 态参考值, 虚拟修正电流取决于SOC_{sc}偏移量SOC_{sc} - SOC_{scref}与交互速率因子K的乘积.式(2)表明: SOC_{sc}位于临界放电区间内, 且仍需继续放电时, *I*_{vir} 取负值, 减小超级电容放电电流(放电电流为正); 在该 区间内*P*_{sc,ref} < 0时, 超级电容维持充电状态, *I*_{vir}为0. 当SOC_{sc}位于临界充电区间内, 且仍需继续充电时, *I*_{vir}取正值, 减小超级电容充电电流(充电电流为负); 在该区间内*P*_{sc,ref} > 0时, 超级电容维持放电状态, *I*_{vir} 为0. 在混合储能控制单元中, 交互速率因子K对*I*_{vir} 的影响也至关重要. *K*越大, 交互电流、功率越大, 交 互速度越快; *K*较小会导致*I*_{vir}偏小, 转换时间变长.

3) 极限充放电区间:0<SOC_{sc}≤a₁或b₁≤SOC_{sc} <1. 当出现超级电容放电至极限区间仍需继续放电 或充电至极限区间仍需继续充电时,为了避免超级电 容过充过放, 需对SOC_{sc}进行限值管理控制, 蓄电池 在该情形下承担全部剩余功率变化. $I_{b.ref.1} = (P_{b.ref} + P_{sc.ref})/U_{bat}, I_{sc.ref.1} = 0分别表示该期间二次功率分$

配混合储能的电流.当出现与极限充放电情形相反的 放电或充电行为时,会使得SOC_{sc}回归至临界充放电 区间.3种状态控制方式具体功率分配如表1所示.

表1	交互控制	及限值管	理混合储能	系统功率	分配
~ I	ヘーム・				/J HC

Table 1 Power distribution of hybrid energy storage system with interactive control and limit management

SOCsc运行区间	充放电状态	功率分配结果	虚拟修正电流
正常运行区间	充/放电	$P_{\text{sc_ref_l}} = P_{\text{sc_ref}}$ $P_{\text{b_ref_l}} = P_{\text{b_ref}}$	$I_{\rm vir} = 0$
此田大上同时	充电	$P_{\text{sc_ref_l}} = P_{\text{sc_ref}}$ $P_{\text{b_ref_l}} = P_{\text{b_ref}}$	$I_{\rm vir} = I_{\rm vir} $
临界允电区间	放电	$P_{\text{sc_ref_l}} = P_{\text{sc_ref}}$ $P_{\text{b_ref_l}} = P_{\text{b_ref}}$	$I_{\rm vir}=0$
把四大中、四体体和。它均	充电	$\begin{split} P_{\text{sc_ref_l}} &= 0 \\ P_{\text{b_ref_l}} &= P_{\text{sc_ref}} + P_{\text{b_ref}} \end{split}$	$I_{\rm vir}=0$
极限允电(限值官理)区间	放电	$P_{\text{sc_ref_1}} = P_{\text{sc_ref}}$ $P_{\text{b_ref_1}} = P_{\text{b_ref}}$	$I_{\rm vir} = 0$
此田社中区内	充电	$P_{sc_ref_1} = P_{sc_ref}$ $P_{b_ref_1} = P_{b_ref}$	$I_{\rm vir}=0$
临芥放电区间	放电	$P_{\text{sc_ref_1}} = P_{\text{sc_ref}}$ $P_{\text{b_ref_1}} = P_{\text{b_ref}}$	$I_{\rm vir} = - I_{\rm vir} $
	充电	$\begin{aligned} P_{\text{sc}_\text{ref}_1} &= P_{\text{sc}_\text{ref}} \\ P_{\text{b}_\text{ref}_1} &= P_{\text{b}_\text{ref}} \end{aligned}$	$I_{\rm vir} = 0$
饭帐成电(限值官理)区间	放电	$\begin{split} P_{\text{sc_ref_l}} &= 0 \\ P_{\text{b_ref_l}} &= P_{\text{sc_ref}} + P_{\text{b_ref}} \end{split}$	$I_{\rm vir} = 0$

5 算例分析

为验证本文提出的改进PI控制及基于SOC_{sc}交互 控制与限值管理混合储能系统二次功率分配控制策 略的有效性,搭建如图1所示光伏并网模型.设置直流 负荷在0.8 s、1.5 s,交流负荷在1.4 s发生变化.图4中 $a_1 = 0.25, a = 0.3, b = 0.7, b_1 = 0.8.$ K取值区间为 [1,4],临界充电期间设置SOC_{scref} = 0.7, K = 2.2;临 界放电期间设置SOC_{scref} = 0.3, K = 2.4.

5.1 公共直流母线电压对比

在同一仿真模型及条件下, PI控制中, 相应控制参数如表2所示.

表2 PI模型控制参数
Table 2 PI model control parameters

类别	名称	数值
改进PI控制参数	控制系数c ₁ 控制系数c ₂ 控制系数c ₃	8.51e-03 4.80e-16 116
改进/传统PI控制参数	PI初始参数	0.1/0.05

对VSC控制中直流母线电压无静差控制中不同PI控制方式进行对比,结果如图6所示.系统参考电

压为700 V(U_{dc.ref}); 传统PI控制下系统直流母线电压 基本维持在680 V左右(U_{dc}); 改进型PI控制(改进U_{dc}) 与模糊PI 控制(模糊PIU_{dc})使得直流母线电压很好的 维持在参考电压值附近, 但模糊PI控制条件下系统运 行时间长, 效率明显降低. 结果表明所述改进PI方法 的优越性.



当公共直流母线电压与参考电压相差较大时,光 伏并网模型中不能真实反映超级电容实时SOC,进而 使得基于SOCsc控制的功率再分配存在较大偏差. 图7给出了改进PI控制(IPPISOC_{sc}曲线)、传统PI控制(PISOC_{sc}曲线)与参考控制条件下(SOC_{scref}曲线) SOC_{sc}曲线对比示意图,SOC_{scref}曲线表示将电压差 值设置为0时(即 $U_e = 0$,系统没有误差)获得的SOC_{sc} 曲线.图7表明,在公共直流母线电压稳定于参考值状 态下,IPPISOC_{sc}曲线更接近于参考曲线,能够真实 反映系统实时SOC_{sc}值;而PISOC_{sc}曲线与系统参考 结果差异较大,影响基于SOC_{sc}控制的混合储能二次 功率分配策略的准确性.





Fig. 7 PI control super capacitor state of charge curve

在系统维持公共直流母线电压平稳于参考值情况下,通过分析SOC_{sc}的变化趋势,验证所提二次功率分配控制策略的有效性.分别对以下工作区间进行具体分析.

5.2 超级电容工作在正常运行区间及临界充电区间

图8为SOCsc曲线对比结果,图9为蓄电池充放电 电流变化曲线对比结果.其中原SOC、Ibat曲线表示不 采用控制手段条件下仿真曲线;新控制SOC、Ihat曲线 表示采用本文所提控制方法下曲线.0.6 s 前表示正常 运行期间,SOCsc曲线、Ibat曲线保持一致.区域a中, 当超级电容充电将至临界区间时, Ivir开始动作, 减小 超级电容充电电流,使得蓄电池充电电流变大(区域1 所示), 增加蓄电池充电电量, 缓解SOCsc变化趋势. 约0.8 s时,超级电容转为放电状态,SOCsc曲线开始同 趋势、幅度下降, 蓄电池电流快速达到与原电流同步 状态. 区域b(区域2)中, 当超级电容继续充电且系统仍 使得超级电容保持充电趋势时,不采用控制手段 下SOCsc不断升高接近限值管理充电区间;而采用本 文所述控制方法在SOCsc达到临界充电警戒值后,由 于Ivir作用使SOCsc变化趋势开始变缓,超级电容充电 电量减小,蓄电池充电电流增加,缓解SOCsc变化幅 度,并使SOCsc往正常运行区间变动.

虚拟修正电流图形如图10所示, *I*vir值相对大小(相对于超级电容电流值)决定了本文所提控制方法下SOCsc变化趋势快慢, *I*vir数值越大, 作用趋势越强.

图10中出现震荡现象原因为: 当P_{sc}>0时(短暂), 超级 电容放电, I_{vir}不参与控制, 其值为0; 只有在临界充电 区间且继续充电情况下I_{vir}产生作用, 其值不为0. 图8 区域b与图9区域2可以看出, 在1.6~1.8 s间由于I_{vir} 值不断变化(相对增加), 新控制SOC曲线在1.6 s 时, 超出临界充电警戒值, 但变化趋势明显缓慢; 在1.8~ 2.2 s间I_{vir}值相对较大, 使得SOC_{sc}趋向于正常运行区 间内变动.



图 8 超级电容荷电状态变化曲线对比图













图11-12给出了图8-9仿真运行4 s时曲线. 图11表

明, 2.9 s时, SOCsc控制在临界充电警戒值, 在前一段 时间内Ivir加持下,SOCsc仍继续往正常运行区间变 动,而后由于 $P_{sc} < 0$, I_{vir} 持续为0, SOC_{sc}开始缓慢增 加. 3.8 s后, Ivir大小保持恒定值, SOCsc稳定于临界充 电警戒值处不再增加; 若运行后期P_{sc} > 0(即放电), SOCsc曲线将开始降低. 图12给出了蓄电池充放电电 流曲线图,在运行2.5 s后,新控制Ibat曲线逐渐逼近 原Ibat曲线,并在仿真后期接近并平行于原Ibat曲线, 维持相对较大的充电电流.图10中,在1.6~2.8 s间,前 期*I*vir不足以产生较好的控制效果,SOCsc变化较小; 使得图11中1.6~2.8 s间仍有SOCsc超过临界充电警 戒值(70%),但SOCsc增长趋势缓慢;随着Ivir增大,使 得SOCsc逐渐往正常区间变动,约2.9 s低于70%.考虑 前期Ivir加持作用,SOCsc继续小幅度减小,图11中原 SOC曲线表明, 1.8 s后超级电容总体上处于充电状态 (即 $P_{sc} < 0$, 且 P_{sc} 大小基本稳定), SOC_{sc}最终稳定在 70%,如图11虚线框所示.



图 11 超级电容荷电状态变化曲线对比图





图 12 蓄电池充放电电流曲线对比图

Fig. 12 Comparison diagram of battery charging and discharging current curve

5.3 超级电容工作在临界放电区间

图13中,由区域c(下面两条曲线)可以看出,无控 制条件下SOC_{se}低于极限放电警戒值,即超级电容放 电至极限放电区域仍然继续放电,超级电容存在过放 现象. 采用本文所述控制方法时, 当接近临界放电区 域时, *I*vir开始动作, 其曲线如图14所示. *I*vir开始期间 数值较小, 减小了超级电容放电趋势, 使SOCsc往正 常区间变化(但趋势较缓); 蓄电池放电电流变大, 如 图15区域3所示, 增加了蓄电池放电电量, 缓解超级电 容放电变化趋势. *I*vir在0.13 s~0.2 s间达到最大且幅 值保持不变, SOCsc维持在极限放电区间不变, 0.2 s后 开始大幅度充电, 荷电状态开始上升.



图 13 超级电容荷电状态变化曲线对比图

Fig. 13 Comparison diagram of charging state change curve of super capacitor



Fig. 14 Ivir curve during critical discharge



Fig. 15 Comparison diagram of battery charge and discharge current curves

5.4 超级电容工作在限值管理区间

当临界充放电控制方法无法满足条件时(*I*vir相对 较小控制效果缓慢,且仍不断继续充电/放电),SOC_{sc} 会达到极限充放电区域.在该状态下,采用限制管理 对SOC_{sc}进行约束,限制超级电容继续充放电,蓄电 池承担所有剩余功率.为验证所述方法的有效性,本 文以极限放电限值管理为例进行分析.如图13中区域 *d*曲线所示,其中限值管理SOC曲线表示采用了限值 管理后的SOC_{sc}曲线,可以看出经临界放电区间控制 后,虽然使SOC_{sc}变化趋势减缓,但未能使SOC_{sc}维持 在临界放电区域.采用限值管理后,SOC_{sc}可维持不 低于极限放电警戒值,避免过放现象,从而延长超级 电容使用寿命.

6 结论

考虑到并网VSC中外环直流母线电压无静差控制,常采用传统PI控制使得直流母线电压平稳性较差. 提出了改进PI控制方式,相比于传统PI控制方法,能够维持公共直流母线电压平稳于参考值,以获得光储 并网模型真实的SOCsc.考虑到超级电容充放电速度 快特点,提出基于SOCsc交互控制及限值管理的控制 方法优化SOCsc,使其保持较好的工作特性.在混合 储能系统临界充放电状态下,通过引入虚拟修正电流, 控制储能元件之间功率再分配;在极限充放电状态下, 采用限值管理,限制超级电容充放电,避免其过充过 放现象,延长其使用寿命.

参考文献

 SU Hao, ZHANG Jiancheng, FENG Donghan, et al. Profit allocation model of cooperative distributed energy resources based on bargaining game theory. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39 (1): 127 – 140.

(苏浩,张建成,冯冬涵,等.模块化混合储能系统及其能量管理策略. 电力自动化设备,2019,39(1):127-140.)

[2] HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(7): 157 – 164.

(何俊强,师长立,马明,等.基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法.电力自动化设备,2020,40(7):157-164.)

- [3] MA Hengrui, WANG Bo, GAO Wenzhong, et al. Optimization strategy for frequency regulation service of regional integrated energy systems considering compensation effect of frequency regulation. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 127 – 135. (马恒瑞, 王波, 高文忠, 等. 考虑调频补偿效果的区域综合能源系统 调频服务优化策略. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 127 – 135.)
- [4] ZARRILLI D, GIANNITRAPANI A, PAOLETTI S, et al. Energy storage operation for voltage control in distribution networks: a receding horizon approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(2): 599 – 609.
- [5] MA Wei, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Optimal dispatching strategy for hybrid energy storage system for smoothing power fluctuation caused by grid-connected photovoltaic. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 58 – 66.

(马伟, 王玮, 吴学智, 等. 平抑光伏并网功率波动的混合储能系统优化调度策略. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 58-66.)

- [6] WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions - an overview. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 28(6): 1593 – 1605. (王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网VSC系统稳定性分析 研究综述. 中国电机工程学报, 2018, 28(6): 1593 – 1605.)
- [7] XIAO Huafeng. Soft-switching techniques for transformerless photovoltaic grid-connected inverters. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(3): 812 821.
 (肖华锋. 非隔离型光伏并网逆变器软开关技术. 中国电机工程学报,
- 2019, 39(3): 812 821.)
 [8] LIU Yingshu, WANG Cuimin. Coordinated control strategy for micro-grid with photovoltaic and energy storage units in grid connected operation. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(1): 127 132.

(刘迎澍,王翠敏.光储微电网并网模式协调控制策略.电力系统及 其自动化学报,2018,30(1):127-132.)

- [9] ZHENG Chao, LI Yuan, LÜ Pan, et al. Influence of large-scaled photovoltaic grid connected on the transient stability and counter measures. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(10): 3403 3411.
 (郑超, 李媛, 吕盼, 等. 规模化光伏并网对暂态稳定影响及应对措施. 高电压技术, 2017, 43(10): 3403 3411.)
- [10] ZHANG Guorong, HOU Likai, PENG Bo, et al. Feedback linearization sliding mode control strategy for soft open point. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 126-133.
 (张国荣, 侯立凯, 彭勃, 等. 柔性多状态开关反馈线性化滑模控制. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 126-133.)
- [11] LI Lanfang, XU Xiaogang, WU Guobing, et al. PI control based on sliding mode variable structure of DC-link voltage for shunt active power filter. *Power System Protection and Control*, 2017, 45 (5): 32 – 37.

(李兰芳,徐晓刚,吴国兵,等.并联型APF直流侧电压的滑模PI控制 策略研究.电力系统保护与控制,2017,45(5):32-37.)

[12] DOU Fei, CAI Hui, GUO Chaohui, et al. DC voltage control of backto-back multi-terminal VSC-HVDC system based on deep reinforcement learning. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 155 – 162.

(窦飞,蔡晖,郭朝辉,等.基于深度强化学习的多端背靠背柔性直流 系统直流电压控制.电力系统自动化,2021,45(19):155-162.)

- [13] LÜ Guangqiang, XU Wenmin, WANG Puyu. Control strategy for electric spring based on fuzzy proportional-integral self-adaptive control in variable universe. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(18): 172 – 178.
 (吕广强, 许文敏, 王谱字. 基于变论域模糊PI自适应控制的电力弹 簧控制策略. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 172 – 178.)
- [14] LI Xuebin, LIU Jianwei. Real-time power distribution method adopting second-order filtering for hybrid energy storage system. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1650 1657.
 (李学斌,刘建伟.采用二阶滤波的混合储能系统实时功率分配方法. 电网技术, 2019, 43(5): 1650 1657.)
- [15] XIE Lirong, ZHENG Hao, WEI Chengwei, et al. Coordinated control strategy of photovoltaichybrid energy storage considering prediction error compensation and fluctuation suppression. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(3): 130 138.
 (谢丽蓉,郑浩,魏成伟,等. 兼顾补偿预测误差和平抑波动的光伏混 合储能协调控制策略. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 130 138.)
- [16] LI Ya'nan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 58 65.
 (李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解--模糊控制策略.电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 58 65.)

[17] YAN Chenyu, FAN Yanfang, YAO Bo. Strategy for smoothing photovoltaic power fluctuation of hybrid energy storage system using self-adaptive variational mode decomposition. *High Voltage Engineering*, 2019, 49(6): 1898 – 1906.
(颜晨煜, 樊艳芳, 姚波. 采用自适应变分模态分解的混合储能平滑

(顾晨运, 吴祀方, 姚波. 禾用百道应受开模态万胜的花言馆能干作 光伏出力波动控制策略. 高电压技术, 2019, 49(6): 1898 – 1906.)

- [18] YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8): 2213 2220.
 (杨子龙, 宋振浩, 潘静, 等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调 控制策略. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2213 2220.)
- [19] LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44 (7): 61 – 69.

(刘忠,杨陈,蒋玮,等.基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术.电力系统自动化,2020,44(7):61-69.)

- [20] WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2012, 24(2): 12 20.
 (王成山,李琰,彭克.分布式电源并网逆变器典型控制方法综述.电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12 20.)
- [21] LI Hongqing, ZHOU Jianping, MAO Dajun, et al. Secondary assignment and interactive control strategy of hybrid energy storage applied

in DC microgrid. *Electric Power Construction*, 2019, 40(5): 13 – 19. (李泓青,周建萍,茅大钧,等. 混合储能系统二次功率分配及交互控制策略在直流微网中的应用. 电力建设, 2019, 40(5): 13 – 19.)

[22] GAO Zhigang, JIANG Fenlin. Research on a modular equalization topology for batter storage system. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(4): 1300 – 1307.
(高志刚,姜奋林. 蓄电池储能系统的模块化均压拓扑研究. 高电压 技术, 2016, 42(4): 1300 – 1307.)

作者简介:

刘海涛 博士,教授,硕士生导师,目前研究方向为微电网运行与

控制关键技术, E-mail: 13851424346@163.com;

马丙泰 硕士研究生,目前研究方向为电力系统储能优化配置,

E-mail: 3037309475@qq.com;

郝思鹏 博士, 教授, 硕士生导师, 目前研究方向为电力系统低频 振荡、配电自动化, E-mail: hspnj@qq.com;

黄 铖 硕士研究生,目前研究方向为电力系统储能优化配置, E-mail: 337366216@qq.com;

张匡翼 硕士研究生,主要研究方向为电压暂降, E-mail: 4194301 16@qq.com.