DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.233 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

支撑微电网和配电网灵活潮流调节的电流源型多端口互联变流器控制技术

李树鹏[1]，李振斌[1]，刘亚丽[1]，梁海深[2]，王坤放[3]，何晋伟[3]
(1.国网天津市电力公司电力科学研究院，天津 300000；2.国网天津市电力公司宝坻供电分公司，天津 300000；3.天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072)

摘要：为了实现多个微电网之间的功率互济、电压频率支撑和储能电池荷电状态SOC(state-of-charge)的协同控制，提出了一种适用于微网群互联的多端口电流源型互联变流器。通过将微网群的平均SOC引入中央控制器的有功指令控制环路，并在环路中加入容量权重因子，实现了多种工况下3个微电网储能SOC的动态均衡。此外，考虑到SOC调整过程中可能出现的微电网频率越限情况，提出了一种兼顾微电网频率性能的SOC-频率协同控制策略，在实现微网群SOC均衡的基础上，保证频率运行在规定范围内。仿真结果验证了所提控制策略的正确性和有效性。

关键词：电流源型变流器；多端口互联变流器；SOC均衡控制；微电网

Multi-port Interconnected Current-source Converter Control Technology Supporting Flexible Power Flow Regulation in Microgrids and Distribution Networks

LI Shupeng[1], LI Zhenbin[1], LIU Yali[1], LIANG Haishen[2], WANG Kunfang[3], HE Jinwei[3]
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300000, China; 2. Baodi Power Supply Company, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300000, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To realize the collaborative control of power mutual assistance, voltage frequency support and state-of-charge (SOC) of energy storage batteries between multiple microgrids, a multi-port interconnected current source converter suitable for the interconnection of microgrids is proposed. Through the introduction of the average SOC of the microgrid group into the active command control loop of a central controller and the addition of a capacity weight factor to the loop, the dynamic equilibrium of energy storage SOCs of three microgrids under various working conditions is realized. In addition, with the consideration of frequency exceeding of the microgrid that may occur during the SOC adjustment process, an SOC-frequency collaborative control strategy that takes into account the frequency performance of the microgrid is put forward, and the frequency operation is guaranteed to be within a specified range on the basis of realizing the SOC equilibrium of the microgrid group. Simulation results verify the correctness and effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: Current-source converter; multi-port interconnected converter; state-of-charge (SOC) equilibrium control; microgrid

收稿日期：2023-09-11；**修回日期**：2023-11-22；**录用日期**：2023-12-04；**网络首发日期**：2024-07-24
基金项目：天津市电力公司科技项目(电科-研发2023-42)
This work is supported by Tianjin Electric Power Company Science and Technology Project under the grant Electric Power-R&D 2023-42

近年来，随着分布式新能源发电在传统微电网中的渗透率不断提升，以能量路由器、电力电子变压器为代表的电力电子、通信控制等技术发展迅猛，充分利用这些技术对“有源”电网开展“主动”管理和调控，可以有效改善电网电能质量水

平，促进可再生能源消纳[1-3]。

随着功率需求的不断增大和工况复杂程度的不断提升，单个微电网由于有限的工作容量和抗干扰能力，难以有效应对大规模负荷瞬时接入、故障随机扰动等特殊工况。通过将地理位置上毗邻的微电网和分布式发电系统互联，实现多个电网之间的灵活功率协调和故障情况下的功率支撑，能够给系统运行的灵活性、可靠性和稳定性带来进一步的提升[4-5]。近年来，多端口电力电子变流器作为一种新型的功率变换设备，具有精确的功率流动控制能力和较好的稳定性[6]，已被广泛应用于多个分布式电源和电网之间的互联[7-8]。然而，传统多端口互联变流器大多基于电压源型变流器，其直流侧采用并联的连接方式，其中一台端口变流器控制直流电压，而其余端口变流器运行在功率控制模式。该方案具有电路结构简单、控制环路物理意义明确等优点，方便对容量和端口进行扩充[9-10]。但直流侧大电容频繁地充放电会在很大程度上缩短储能电容的寿命，给系统的安全稳定运行带来威胁[11-12]。

到目前为止，有关微网群多端口互联变流器的研究大多围绕基于互联变流器 ILC(interlinking converter)的微网群的稳态功率分配问题，通过归一化下垂控制、自适应下垂控制等方式来实现不同微电网之间源对负荷的分摊[13-14]。需要注意的是，微电网内部储能电池的荷电状态 SOC(state-of-charge)也是衡量微电网电压、频率支撑能力的重要指标。此外，多储能系统 SOC 的均衡控制可以保证多个电池组充放电速度一致，进而提高微电网的经济性，同时提高电池组的容量利用率[15]。但目前有关微电网储能SOC的研究，大多集中在如何实现微电网内部并联储能系统之间的SOC均衡，对于微网群层级的多个微电网之间储能 SOC 均衡的研究则报道较少。

本文针对微网群系统配网之间 SOC 不均衡问题和电压源型多端口柔性互联系统的局限性，提出一种面向微网群调控的电流源型多端口互联变流器，通过将微网群的平均 SOC 引入中央控制器的有功指令控制环路，并在环路中加入容量权重因子，实现多种工况下 3 个微电网储能 SOC 的动态均衡。此外，考虑到 SOC 调整过程中可能出现的微电网频率越限情况，提出一种兼顾微电网频率性能的 SOC−频率协同控制策略，在实现微网群 SOC 均衡的基础上，保证频率运行在规定范围内。最后仿真验证所提控制策略的有效性。

1 系统结构及控制器架构

1.1 系统结构

本文研究系统的结构示意如图 1 所示。该系统由电流源型多端口互联变流器与 3 个微电网组成。各微电网内部由风电、光伏、储能等分布式电源和负荷构成。电流源型多端口互联变流器由 3 台电流源型变流器 CSC(current-source converter)(CSC1、CSC2、CSC3)在直流侧串联组成，采用直流母线大电感作为储能器件，其交流侧通过工频隔离变压器与各微电网相连，并通过本文所提的控制方式与各微电网进行功率交换。系统包含：1 个中央控制器，

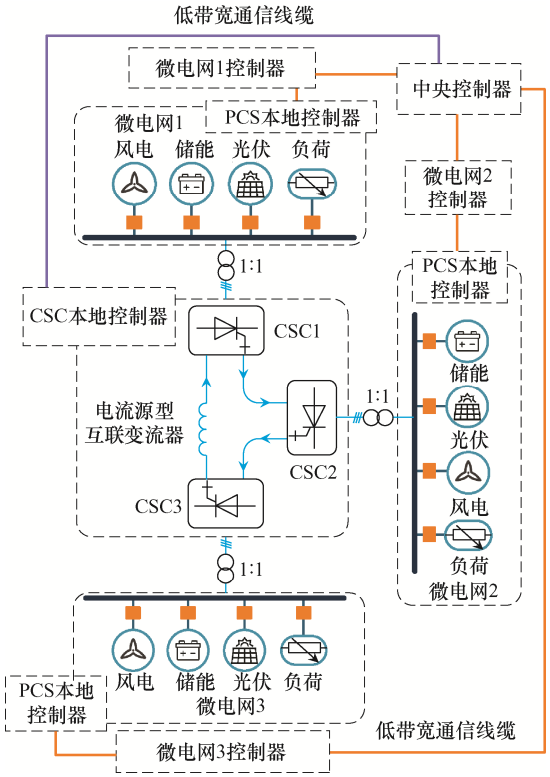


图 1 系统结构示意

Fig. 1 Schematic of system structure

负责采集微电网信息并向 CSC 本地控制器下发有功指令；3 个微电网控制器，负责向中央控制器上传 SOC 信息；3 个 PCS 本地控制器，负责接收微电网控制器的调频指令；3 个 CSC 本地控制器，负责对中央控制器的指令进行跟踪，图 1 所有控制器之间均采用低带宽通信方式。这种情况下，控制器仅能传输部分变化速度较慢信号，如输出功率、电压幅值、频率等。系统端口本地控制性能，如电压、电流环、功率调节环性能，受端口间通信带宽影响较小，而多个变流器直接的功率分配则会受通信带宽影响。一般来说，针对本文所提出多个独立微电网互联的应用，通信延迟需维持在 20 ms 以内。

1.2 控制器架构

中央控制器对微电网的SOC信息$SOC_{\mathrm{MG}k}$进行采集。此外，中央控制器负责对 ILC 各个 CSC 的有功指令 $P_{k,\mathrm{ref,CSC}}$ 进行下发。3 台 CSC 的本地控制器中，CSC1、CSC2 的本地控制器采用 PQ 控制策略对中央控制器的功率指令进行跟踪，CSC3 的本地控制器负责维持 ILC 的直流母线电流。3 个微电网控制器对频率的二次调整指令 Δf_{MG1}、Δf_{MG2}、Δf_{MG3} 向 PCS 本地控制器进行下发。

2 微网群 SOC 均衡控制策略

2.1 子网的控制方式

微电网中的光伏和风电接口变流器采用传统的最大功率跟踪控制策略，储能接口变流器除了对系统的频率和电压进行支撑，还要完成微电网内部并联储能系统间的 SOC 均衡。为此，储能接口变流器采用下垂 SOC 均衡控制策略[15]，其下垂特性为

$$f_{\mathrm{MG,ref,ES}}=f_{\mathrm{MG,0,ES}}-K_{\mathrm{MG,P,ES}}(P_{\mathrm{MG,ES}}-P_{\mathrm{MG,0,ES}})-K_{\mathrm{SOC,MG}}(1-SOC_{\mathrm{MG}}) \tag{1}$$

式中：$f_{\mathrm{MG,ref,ES}}$ 为微电网中储能变流器的参考频率；$f_{\mathrm{MG,0,ES}}$ 为储能系统的额定输出频率；$K_{\mathrm{MG,P,ES}}$ 为储能变流器的有功功率下垂系数；$P_{\mathrm{MG,ES}}$ 为储能变流器当前输出的有功功率；$P_{\mathrm{MG,0,ES}}$ 为储能变流器的额定有功功率；SOC_{MG} 为微电网储能电池的荷电状态；$K_{\mathrm{SOC,MG}}$ 为与 SOC 相关的下垂系数，其取值满足

$$\begin{cases}K_{\mathrm{SOC,MG}}<\left|\Delta f_{\mathrm{MG,max}}\right|/(1-SOC_{\mathrm{MG,min}})\\ K_{\mathrm{SOC,MG}}>\left|\Delta f_{\mathrm{MG,max}}\right|/(1-SOC_{\mathrm{MG,max}})\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\Delta f_{\mathrm{MG,max}}$ 为微电网频率允许变化的最大范围；$SOC_{\mathrm{MG,max}}$ 和 $SOC_{\mathrm{MG,min}}$ 分别为微电网储能电池荷电状态的最大值和最小值。

2.2 微网群 SOC 均衡控制策略

本节将在各微电网实现内部 SOC 均衡的基础上，进一步通过控制实现 3 个微电网之间 SOC 的动态均衡。交流微电网 k 的储能电池荷电状态 $SOC_{\mathrm{MG}k}$ 的表达式为

$$SOC_{\mathrm{MG}k}=SOC_{\mathrm{MG0}k}-\frac{\int I_{\mathrm{bat}k}\mathrm{d}t}{AH_{\mathrm{MG}k}}=SOC_{\mathrm{MG0}k}-\frac{\int P_{\mathrm{MG,ES}k}\mathrm{d}t}{V_{\mathrm{MGdcES}}AH_{\mathrm{MG}k}} \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{MG,ES}k}$ 为微电网 k 中储能的输出功率；$AH_{\mathrm{MG}k}$ 为微电网 k 储能电池的安时数；$SOC_{\mathrm{MG0}k}$ 为 SOC 初始状态；$I_{\mathrm{bat}k}$、V_{MGdcES} 分别为微电网 k 储能系统的输出电流和直流电压(默认所有子网直流电压相同)。每个交流微电网中，根据功率平衡可以得到

$$P_{\mathrm{MG,ES}k}=P_{\mathrm{MG,Load}k}-P_{\mathrm{MG,Wind}k}-P_{\mathrm{MG,PV}k}-P_{\mathrm{ILC}k} \tag{4}$$

式中：$P_{\mathrm{MG,Load}k}$ 为微电网 k 的负载功率；$P_{\mathrm{MG,Wind}k}$ 为微电网 k 的风电输出功率；$P_{\mathrm{MG,PV}k}$ 为微电网 k 的光伏输出功率；$P_{\mathrm{ILC}k}$ 为互联变流器传递给微电网 k 的有功功率。通过式(4)可以看出，通过调整互联变流器向微电网 k 的输出功率 $P_{\mathrm{ILC}k}$ 可间接调整储能的输出功率 $P_{\mathrm{MG,ES}k}$。各微电网内部储能电池当前的剩余电量可以用荷电状态和安时数的乘积 $SOC_{\mathrm{MG}k}AH_{\mathrm{MG}k}$ 来表示。为了使 3 个微电网的 SOC 能够达到均衡，在设计控制策略之前，对整个系统 SOC 的平均值 SOC_{ave} 定义为

$$SOC_{\mathrm{ave}}=\frac{\sum_{k=1,2,3}SOC_{\mathrm{MG}k}AH_{\mathrm{MG}k}}{\sum_{k=1,2,3}AH_{\mathrm{MG}k}} \tag{5}$$

图2所示为SOC均衡策略的控制框图，将$SOC_{\mathrm{MG}k}$与 SOC_{ave} 的偏差通过比例积分控制器生成 CSC1、CSC2 本地控制器的有功功率参考值 $P_{k,\mathrm{ref,CSC}}$，图中

$k_{\mathrm{p,SOC,cen}}$和$k_{\mathrm{i,SOC,cen}}$分别为中央控制器中SOC均衡控制器的比例积分控制器的比例系数和积分系数。

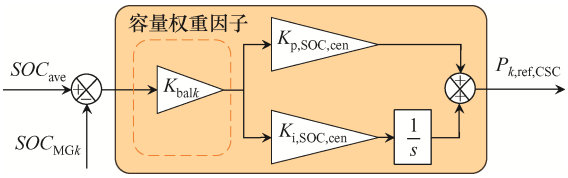


图 2 微网群 SOC 均衡策略控制框图

Fig. 2 Control block diagram of SOC equilibrium strategy for microgrid group

需要注意的是，由于 CSC3 需要对直流电流I_{dc}进行控制，因此 CSC3 端口的有功功率是被动调节的，其有功功率输出由端口间的功率平衡关系决定，但这种调节方式不能保证 CSC3 的有功功率输出能使微电网 3 的 SOC 按照预设的趋势去调节。故在功率参考值的生成方程中，引入了容量权重因子$K_{\mathrm{bal}k}$，则功率参考值的表达式为

$$P_{k,\mathrm{ref,CSC}}=(SOC_{\mathrm{ave}}-SOC_{\mathrm{MG}k})K_{\mathrm{bal}k}G_{\mathrm{c,SOC,cen}}(s) \tag{6}$$

式中，$G_{\mathrm{c,SOC,cen}}(s)$为比例积分控制器的传递函数，其表达式为

$$G_{\mathrm{c,SOC,cen}}(s)=k_{\mathrm{p,SOC,cen}}+\frac{k_{\mathrm{i,SOC,cen}}}{s} \tag{7}$$

为了使功率参考值满足端口间的功率平衡关系，各功率参考值之间需要满足

$$P_{1,\mathrm{ref,CSC}}+P_{2,\mathrm{ref,CSC}}+P_{3,\mathrm{ref,CSC}}=0 \tag{8}$$

将式(6)代入式(8)可以得到

$$\begin{aligned}&(SOC_{\mathrm{ave}}-SOC_{\mathrm{MG1}})K_{\mathrm{bal1}}G_{\mathrm{c,SOC,cen}}(s)+\\&\quad(SOC_{\mathrm{ave}}-SOC_{\mathrm{MG2}})K_{\mathrm{bal2}}G_{\mathrm{c,SOC,cen}}(s)+\\&\quad(SOC_{\mathrm{ave}}-SOC_{\mathrm{MG3}})K_{\mathrm{bal3}}G_{\mathrm{c,SOC,cen}}(s)=0\end{aligned} \tag{9}$$

将式(5)SOC_{ave}的表达式代入式(9)，并令式(9)中$SOC_{\mathrm{MG}k}$对应项的系数相等，可以得到

$$\begin{cases}(K_{\mathrm{bal1}}+K_{\mathrm{bal2}}+K_{\mathrm{bal3}})AH_{\mathrm{MG1}}=\\\quad K_{\mathrm{bal1}}(AH_{\mathrm{MG1}}+AH_{\mathrm{MG2}}+AH_{\mathrm{MG3}})\\(K_{\mathrm{bal1}}+K_{\mathrm{bal2}}+K_{\mathrm{bal3}})AH_{\mathrm{MG2}}=\\\quad K_{\mathrm{bal2}}(AH_{\mathrm{MG1}}+AH_{\mathrm{MG2}}+AH_{\mathrm{MG3}})\\(K_{\mathrm{bal1}}+K_{\mathrm{bal2}}+K_{\mathrm{bal3}})AH_{\mathrm{MG3}}=\\\quad K_{\mathrm{bal3}}(AH_{\mathrm{MG1}}+AH_{\mathrm{MG2}}+AH_{\mathrm{MG3}})\end{cases} \tag{10}$$

将式(10)所示的三元一次方程进行求解，可以得到

$$\frac{K_{\mathrm{bal1}}}{AH_{\mathrm{MG1}}}=\frac{K_{\mathrm{bal2}}}{AH_{\mathrm{MG2}}}=\frac{K_{\mathrm{bal3}}}{AH_{\mathrm{MG3}}} \tag{11}$$

通过观察式(11)可以发现，当$K_{\mathrm{bal}k}$正比于$AH_{\mathrm{MG}k}$时，该等式成立。因此，令

$$K_{\mathrm{bal}k}=B\,AH_{\mathrm{MG}k} \tag{12}$$

$$B=\frac{1}{AH_{\mathrm{MG1}}+AH_{\mathrm{MG2}}+AH_{\mathrm{MG3}}} \tag{13}$$

式中，B为公共的比例系数。

引入容量权重因子后，CSC3 的端口输出有功功率一定满足

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{CSC3}}&=0-P_{\mathrm{CSC1}}-P_{\mathrm{CSC2}}=\\&\quad 0-P_{1,\mathrm{ref,CSC}}-P_{2,\mathrm{ref,CSC}}=\\&\quad(SOC_{\mathrm{ave}}-SOC_{\mathrm{MG3}})K_{\mathrm{bal3}}G_{\mathrm{c,SOC,cen}}(s)\end{aligned} \tag{14}$$

式中，P_{CSC1}、P_{CSC2}、P_{CSC3}分别为 CSC1、CSC2、CSC3 向微电网 1、2、3 输出的有功功率。此时，虽然 CSC3 的有功功率在被动调节，但容量权重因子的加入可以保证其有功功率输出满足 SOC 的闭环控制方程，保证 SOC 的均衡控制效果。

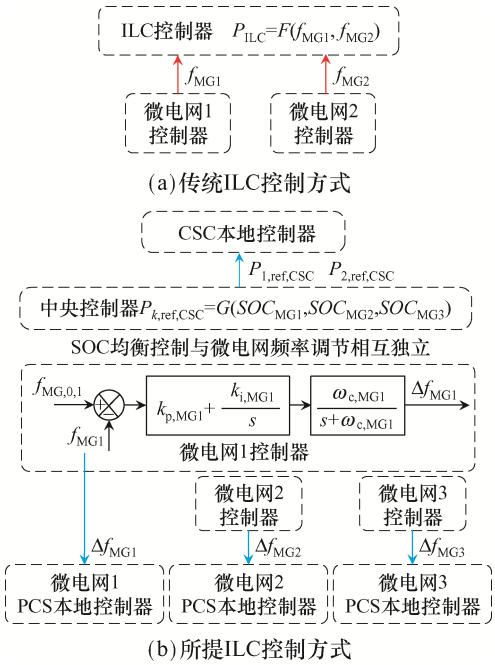
2.3 微网群 SOC-频率协同控制

SOC–频率控制策略示意如图 3 所示。图中，$f_{\mathrm{MG}k}$为微电网 k 的频率；$f_{\mathrm{MG,0,}k}$为微电网 k 的额定频率；$\Delta f_{\mathrm{MG}k}$为微电网 k 控制器下发给微电网 PCS 本地控制器的频率调整指令；$k_{\mathrm{p,MG}k}$、$k_{\mathrm{i,MG}k}$分别为微电网控制器的比例积分控制器的比例系数、积分系数；$\omega_{\mathrm{c,MG}k}$为低通滤波器的截止角频率。

传统的 ILC 控制策略如图 3(a)所示，在这种控制方式下，ILC 控制器需要对微电网的频率信息进行采样，其有功功率参考值的生成与微电网的频率关系密切，其有功功率参考值P_{ILC}可以表示为

$$P_{\mathrm{ILC}}=F(f_{\mathrm{MG1}},f_{\mathrm{MG2}}) \tag{15}$$

式中，$F(\cdot)$为微电网频率到P_{ILC}的函数关系。式(15)表明，传统的 ILC 控制和微电网自身的频率控制是无法解耦的。



(a)传统ILC控制方式

(b)所提ILC控制方式

图 3　SOC−频率控制策略示意

Fig. 3 Schematic of SOC-frequency control strategy

本文所提 ILC 控制策略如图 3(b)所示，微电网控制器的控制方程表示为

$$\Delta f_{MGk}=(f_{MG,0,k}-f_{MGk})\cdot\left(k_{p,MGk}+\frac{k_{i,MGk}}{s}\right)\left(\frac{\omega_{c,MGk}}{s+\omega_{c,MGk}}\right) \tag{16}$$

从图 3(b)中可以看到，本文所提的 ILC 控制策略中，有功功率参考值的方程为

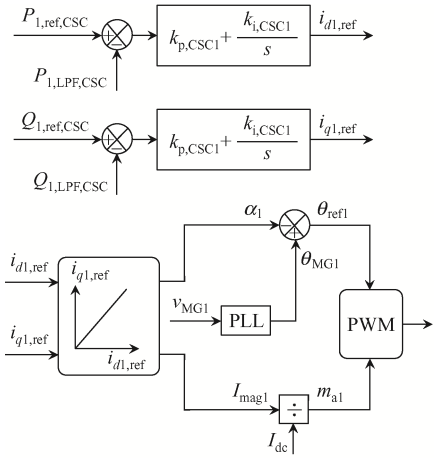
$$P_{k,ref,CSC}=G(SOC_{MG1},SOC_{MG2},SOC_{MG3}) \tag{17}$$

式中，$G(\cdot)$为式(6)所示的函数关系。可以看到，式(17)与微电网频率无关，表明 SOC 的均衡控制和微电网的频率调整是独立进行互不干涉的。因此，可以同时实现 SOC 和频率二者的协同控制。

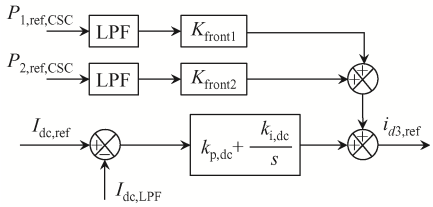
2.4　CSC 本地控制器

CSC 本地控制器控制框图如图 4 所示。其中 CSC1 的本地控制器采用 PQ 控制策略对中央控制器下发的有功、无功指令进行跟踪，其控制框图如图 4(a)所示。

图 4 中：v_{MG1} 为微电网 1 的交流电压；$P_{1,ref,CSC}$、$Q_{1,ref,CSC}$ 分别为中央控制器下发的有功、无功指令；$P_{1,LPF,CSC}$、$Q_{1,LPF,CSC}$ 分别为 CSC1 的输出功率 P_{CSC1}、



(a)CSC1本地控制器控制框图



(b)CSC3本地控制器控制框图

图 4　CSC 本地控制器控制框图

Fig. 4 Control block diagram of local CSC controllers

Q_{CSC1} 经低通滤波器后的有功和无功功率，表示为

$$P_{1,LPF,CSC}=\frac{\omega_{c,PQ}}{s+\omega_{c,PQ}}P_{CSC1} \tag{18}$$

$$Q_{1,LPF,CSC}=\frac{\omega_{c,PQ}}{s+\omega_{c,PQ}}Q_{CSC1} \tag{19}$$

式中，$\omega_{c,PQ}$ 为低通滤波器的截止角频率。则有功、无功指令的控制方程为

$$i_{d1,ref}=\left(k_{p,CSC1}+\frac{k_{i,CSC1}}{s}\right)(P_{1,ref,CSC}-P_{1,LPF,CSC}) \tag{20}$$

$$i_{q1,ref}=\left(k_{p,CSC1}+\frac{k_{i,CSC1}}{s}\right)(Q_{1,ref,CSC}-Q_{1,LPF,CSC}) \tag{21}$$

式中：$i_{d1,ref}$ 和 $i_{q1,ref}$ 分别为 CSC1 本地控制器 d 轴和 q 轴电流参考值；$k_{p,CSC1}$ 和 $k_{i,CSC1}$ 分别为比例积分控制器的比例系数和积分系数。得到 d、q 轴的电流参考值之后，可以计算调制电流信号的调制因数 m_{a1} 和相角 θ_{ref1}，其表达式分别为

$$m_{a1}=\frac{I_{mag1}}{I_{dc}}=\frac{\sqrt{i_{d1,ref}^2+i_{q1,ref}^2}}{I_{dc}} \tag{22}$$

$$\theta_{\mathrm{ref1}}=\theta_{\mathrm{MG1}}-\alpha_1=\tan^{-1}(i_{q1,\mathrm{ref}}/i_{d1,\mathrm{ref}}) \tag{23}$$

式中：I_{dc}为直流母线电流；θ_{MG1}为锁相得到的微电网侧的电压相角；α_1为调制电流矢量相对于网侧电压的延迟角。

CSC2 的本地控制器原理与 CSC1 相同。CSC3 的本地控制器与 CSC1、CSC2 有所不同，其直流侧需要维持稳定的直流电流 I_{dc}。根据基尔霍夫电压定律，ILC 的直流电流可以表示为

$$I_{\mathrm{dc}}(s)=\frac{-V_{\mathrm{dc},1,\mathrm{CSC}}-V_{\mathrm{dc},2,\mathrm{CSC}}-V_{\mathrm{dc},3,\mathrm{CSC}}-I_{\mathrm{dc}}R_{\mathrm{dc}}}{sL_{\mathrm{dc}}} \tag{24}$$

式中：$V_{\mathrm{dc},k,\mathrm{CSC}}$为 CSC$k$ 直流端口的平均输出电压；R_{dc}和 L_{dc}分别为直流侧等效电阻和直流母线电感。为了降低 $V_{\mathrm{dc},1,\mathrm{CSC}}$、$V_{\mathrm{dc},2,\mathrm{CSC}}$对 I_{dc}控制的影响，将与直流端口电压呈比例关系的有功功率参考指令 $P_{k,\mathrm{ref,CSC}}$引入前馈，其控制方程为

$$\begin{aligned}i_{d3,\mathrm{ref}}=&\left(k_{\mathrm{p,dc}}+\frac{k_{\mathrm{i,dc}}}{s}\right)(I_{\mathrm{dc,ref}}-I_{\mathrm{dc,LPF}})+P_{1,\mathrm{ref,CSC}}\cdot\\&\left(\frac{\omega_{\mathrm{c,dc}}}{s+\omega_{\mathrm{c,dc}}}\right)K_{\mathrm{front1}}+P_{2,\mathrm{ref,CSC}}\left(\frac{\omega_{\mathrm{c,dc}}}{s+\omega_{\mathrm{c,dc}}}\right)K_{\mathrm{front2}}\end{aligned} \tag{25}$$

式中：K_{front1}、K_{front2}分别为 CSC1、CSC2 有功功率参考值对应的前馈系数；$i_{d3,\mathrm{ref}}$为 CSC3 本地控制器的 d 轴电流参考值；$k_{\mathrm{p,dc}}$、$k_{\mathrm{i,dc}}$分别为本地控制器 3 的比例系数、积分系数；$I_{\mathrm{dc,ref}}$为直流母线电流参考值；$\omega_{\mathrm{c,dc}}$为低通滤波器的截止角频率；$I_{\mathrm{dc,LPF}}$为经低通滤波器滤波后的直流母线电流，其表达式为

$$I_{\mathrm{dc,LPF}}=\frac{\omega_{\mathrm{c,dc}}}{s+\omega_{\mathrm{c,dc}}}I_{\mathrm{dc}} \tag{26}$$

3 仿真验证

为了验证本文所提控制策略的正确性和有效性，在 MATLAB/Simulink 环境下对三端口电流源型互联变流器和微电网系统进行了仿真分析，仿真参数见表 1。

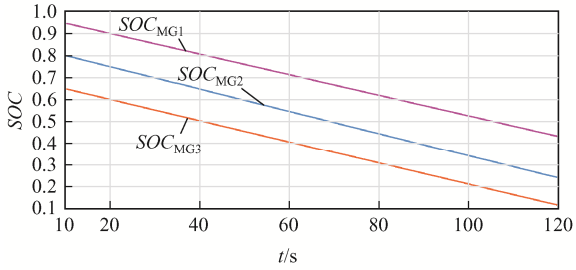
表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

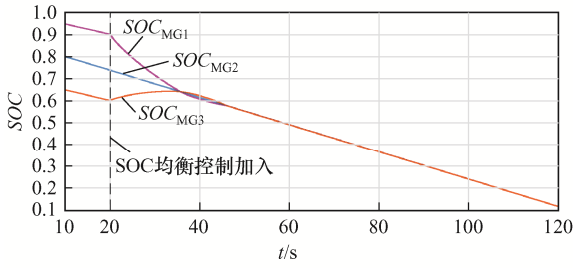
仿真参数	数值
微电网额定线电压有效值/V	400
微电网 1 额定容量/(kV·A)	200
微电网 2 额定容量/(kV·A)	240
微电网 3 额定容量/(kV·A)	280
微电网 1、2、3 额定频率/Hz	50
微电网控制器比例系数 $k_{\mathrm{p,MG}k}$	1
微电网控制器积分系数 $k_{\mathrm{i,MG}k}$	5
中央控制器比例系数 $k_{\mathrm{p,SOC,cen}}$/W	15 000
中央控制器积分系数 $k_{\mathrm{i,SOC,cen}}$/(W/s)	75 000

3.1 固定负载工况 SOC 均衡效果仿真

首先，对 3 个子网在额定工况附近时的 SOC 均衡效果进行仿真分析，SOC 均衡控制加入前、后 SOC 的仿真波形如图 5 所示。图 5(a)为微网群 SOC 均衡控制策略加入前 SOC 的仿真波形，可以看出，3 个微电网的 SOC 相互独立，互不影响，没有办法做到相互支撑。图 5(b)为微网群 SOC 均衡控制策略加入后 3 个微电网 SOC 的变化情况。



(a)SOC均衡控制加入前



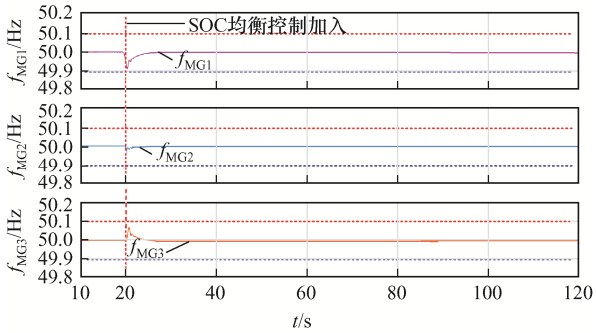
(b)SOC均衡控制加入后

图 5 SOC 均衡控制加入前、后的仿真波形

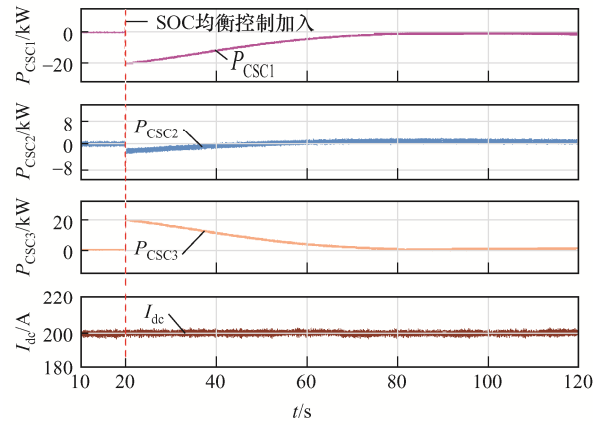
Fig. 5 Simulation waveforms of before and after adding SOC equilibrium control

图 6 为 SOC 均衡控制加入后 3 个微电网的频率 f_{MG1}、f_{MG2}、f_{MG3}和 3 个 CSC 向 3 个微电网输出的有功功率 P_{CSC1}、P_{CSC2}、P_{CSC3}，以及直流母线电

流 I_{dc} 的波形变化情况。



(a)微电网频率变化波形



(b)P_{CSCk}和I_{dc}仿真波形

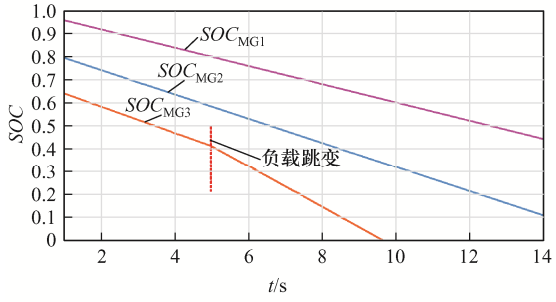
图 6　SOC 均衡控制加入后各参数的仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of each parameter after adding SOC equilibrium control

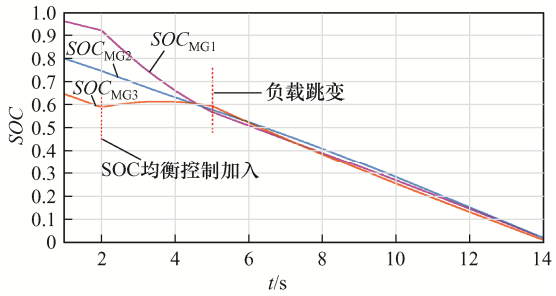
各个微电网 SOC 的初始状态与图 5 相同。系统运行到 2 s 时启动微网群的 SOC 均衡控制策略。由于 SOC_{MG3} 过低，因此 ILC 增大对微电网 3 的输出功率 P_{CSC3} 以降低其储能系统的出力，微电网 3 的频率 f_{MG3} 有所提高；由于 SOC_{MG1} 较高，因此 ILC 从微电网 1 中吸收有功以增大其储能系统的出力，与此同时，微电网 1 的频率 f_{MG1} 有所下降。大约经过 10 s，3 个微电网的 SOC 达到均衡状态。同时也可以看到，功率传送过程中 3 个微电网的频率均没有出现越限情况，且直流电流 I_{dc} 可以保持稳定在 200 A 附近。

3.2　负载跳变工况 SOC 均衡效果仿真

为了验证所提控制策略应对负载跳变工况的性能，将微电网 3 发生负载跳变前后以及微网群 SOC 均衡控制策略加入前后的情形进行了仿真分析。SOC 均衡控制加入前、后负载跳变工况下的仿真波形如图 7 所示。



(a)SOC均衡控制加入前



(b)SOC均衡控制加入后

图 7　SOC 均衡控制加入前、后负载跳变工况下的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms under load hopping conditions before and after adding SOC equilibrium control

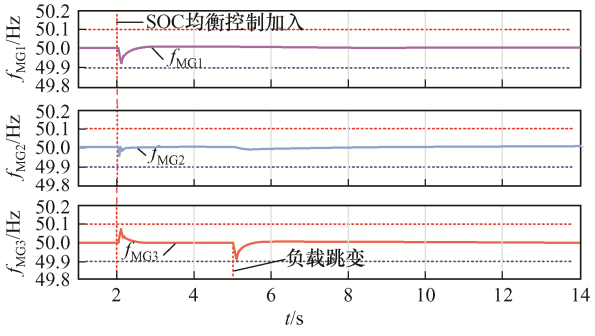
图 7(a)为 SOC 均衡控制策略加入前 SOC 的仿真波形，5 s 时微电网 3 的负载增加，此时微电网 3 的储能电池放电速度加快，即使其他 2 个微电网的储能 SOC 较高，也无法对其起到支撑作用。图 7(b)为 SOC 均衡控制策略加入后 3 个微电网 SOC 的变化情况，从图 7(b)中可以看出，负载跳变的产生对 3 个微电网的 SOC 达到均衡状态所需的时间均会有一定的影响，但这种影响是可接受的，一方面不会给 SOC 之间带来很大偏差；另一方面 SOC 的均衡趋势没有被破坏。

图 8 为与图 7(b)工况对应的 3 个微电网的频率 f_{MG1}、f_{MG2}、f_{MG3} 和 3 个 CSC 向 3 个微电网输出的有功功率 P_{CSC1}、P_{CSC2}、P_{CSC3}，以及 3 个微电网内部 PCS 的有功出力 P_{PCS1}、P_{PCS2}、P_{PCS3} 的变化情况。

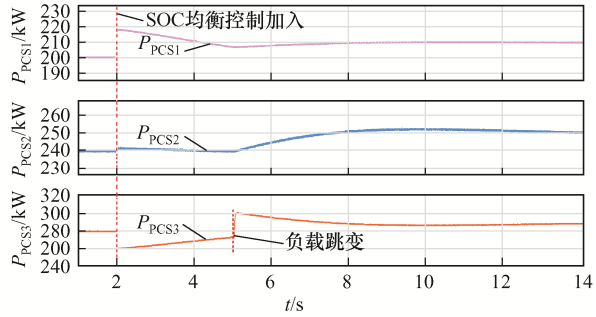
从图 8 中可以看出，SOC 均衡控制策略的启动和负载跳变的出现均会导致微电网的频率出现一定的波动，但都会在微电网的频率控制下回到额定频率附近。

SOC 均衡控制加入后负载跳变工况下 P_{CSCk} 和 I_{dc} 仿真波形如图 9 所示。从图 9 的波形中可以看出，负

载跳变的发生给 ILC 的 CSC3 交流端口的输出功率 P_{CSC3} 和直流母线电流 I_{dc} 均带来了一定程度的波动，但整体上波动都被限制在可接受的范围内。



(a)微电网频率变化波形



(b)微电网PCS输出功率仿真波形

图 8 SOC 均衡控制加入后负载跳变工况下微电网频率和输出功率波形

Fig. 8 Frequency and output power waveforms of microgrid under load hopping conditions after adding SOC equilibrium control

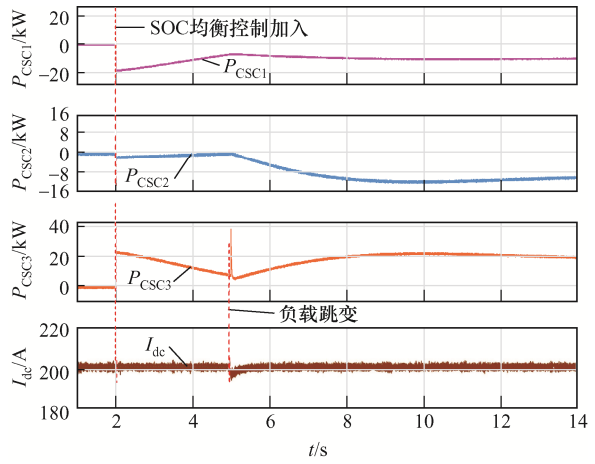


图 9 SOC 均衡控制加入后负载跳变工况下 P_{CSCk} 和 I_{dc} 仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of P_{CSCk} and I_{dc} under load hopping conditions after adding SOC equilibrium control

4 结语

本文针对微电网之间 SOC 均衡的需求，研究了一种基于电流源型多端口互联变流器的微网群 SOC 均衡控制策略。该策略通过定义微网群的平均 SOC，将 3 个微电网的 SOC 通过闭环控制实现动态均衡，并由此提出了一种基于容量权重因子的有功功率控制方法。为了实现微网群 SOC 和频率的同时控制，还提出了微网群 SOC-频率协同控制策略。仿真验证结果表明，本文所提电流源型多端口互联变流器的 SOC 均衡控制策略可以实现多种场景下的微网群 SOC 均衡控制。

参考文献：

[1] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-580.
Li Bo, Chen Minyou, Zhong Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-580. (in Chinese)

[2] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
Zhuo Zhenyu, Zhang Ning, Xie Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191. (in Chinese)

[3] 卢军, 杨沛豪, 何凯琳. 新能源储能微电网惯量支撑性能研究[J]. 电源学报, 2024, 22(4):182-191.
Lu Jun, Yang Peihao, He Kailin. Research on inertia support performance of new energy storage microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 182-191. (in Chinese)

[4] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 107-115.
Zhi Na, Xiao Xi, Tian Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 107-115. (in Chinese)

[5] 赵珍珍, 王维庆, 樊小朝, 等. 基于 NSGA-II-PSO 算法的微电网多目标优化运行模式[J]. 电源学报, 2023, 21

(1): 118-125.

Zhao Zhenzhen, Wang Weiqing, Fan Xiaochao, et al. Multi-objective optimization operation model of microgrid based on NSGA-II-PSO algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 118-125. (in Chinese)

[6] 刘计龙, 陈鹏, 肖飞, 等. 面向舰船综合电力系统的 10 kV/2 MW 模块化多电平双向直流变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 983-997.

Liu Jilong, Chen Peng, Xiao Fei, et al. Control strategy of 10 kV/2 MW modular multilevel bidirectional DC-DC converter for vessel integrated power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (4): 983-997. (in Chinese)

[7] 田明杰, 吴俊勇, 熊飞, 等. 应用于混合储能的组合级联式多端口变流器拓扑结构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 81-89.

Tian Mingjie, Wu Junyong, Xiong Fei, et al. Research on combination of cascaded multiport converter topology in hybrid energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 81-89. (in Chinese)

[8] Ma Dajun, Chen Wu, Shu Liangcai, et al. A MMC-based multiport AC–N–DC converter for hybrid AC/DC systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(12): 3567-3571.

[9] 林艳艳, 肖宏飞, 刘光宇, 等. 直流互联群微网系统的协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(8): 77-86.

Lin Yanyan, Xiao Hongfei, Liu Guangyu, et al. Coordinated control strategy for DC interconnected group-microgrid system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(8): 77-86. (in Chinese)

[10] 薛国清, 贵献国, 李雄. 适用于 HVDC 和 HVAC 高效稳定互联的 MMC 双端口电网形成控制[J]. 电源学报, 2024, 22 (3): 287-297.

Xue Guoqing, Gui Xianguo, Li Xiong. MMC dual-port grid-forming control for efficient and stable interconnection of HVDC and HVAC [J]. Journal of Power Supply, 2024,22(3):287-297. (in Chinese)

[11] 白志红. 电流型多电平变流器的一些相关理论以及应用技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

Bai Zhihong. Research on some related theories and application technologies of current-source multilevel converter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)

[12] Wu B, Narimani M. High-power converters and AC drives [M]. 2nd edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2017.

[13] 王强, 冉鹏. 孤网储能系统电流均分与直流母线电压稳定的控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(6): 132-140.

Wang Qiang, Ran Peng. Control strategy for current equalization of energy storage systems and voltage stability of DC bus in isolated microgrid [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(6): 132-140. (in Chinese)

[14] 吴青峰. 微电网多电池储能系统的 SOC 协同控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.

Wu Qingfeng. Research on SOC cooperative control of micro-grid multi-battery energy storage system [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)

[15] Sun Xiaofeng, Hao Yancong, Wu Qingfeng, et al. A multifunctional and wireless droop control for distributed energy storage units in islanded AC microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 736-751.



李树鹏

作者简介：

李树鹏(1990—　)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：电能质量，新能源发电。E-mail：18102006278@163.com。

李振斌(1983—　)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：电能质量，新能源发电。E-mail：lizhenbin33554610@163.com。

刘亚丽(1983—　)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：电能质量，新能源发电。E-mail：liuyali_sdu@163. com。

梁海深(1985—　)，男，本科，正高级工程师。研究方向：电能质量，新能源发电。E-mail：lianghaishen@126. com。

王坤放(1998—　)，男，硕士研究生。研究方向：大功率电流源变流器技术。E-mail：kf_wang@tju.edu.cn。

何晋伟(1983—　)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：微电网，分布式发电，电能质量，大功率电力电子变流器技术。E-mail：jinwei.he@tju.edu.cn。

(责任编辑：陈国珍)