

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230115

基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统 分布式控制策略

梁海峰, 丁政, 李鹏

(华北电力大学河北省分布式储能与微网重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 针对孤岛直流微电网中多个储能单元的协调控制, 提出了一种基于改进一致性算法的储能系统分布式控制策略。首先, 提出了一种改进一致性算法, 并证明该算法相比经典一致性算法收敛时间更短。然后, 基于改进一致性算法, 提出了一种储能系统分布式控制策略, 通过合理调节各储能单元的功率, 维持了直流母线电压的稳定, 避免了储能电池的过充过放。该策略具有两种运行模式, 分别适用于微电网有扰动与无扰动的情况, 在及时调节储能单元功率的同时, 减少了控制所需的通信量和计算量。最后, 搭建了孤岛直流微电网系统仿真算例, 仿真验证了所提控制策略的有效性及其在控制时间方面的优越性。

关键词: 直流微电网; 储能; 分布式控制; 一致性算法; 下垂控制

Distributed control strategy of an energy storage system in an isolated DC microgrid based on an improved consensus algorithm

LIANG Haifeng, DING Zheng, LI Peng

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A distributed control strategy of an energy storage system based on an improved consensus algorithm is proposed to solve the coordinated control problem of multiple energy storage units in an isolated DC microgrid. First, an improved consensus algorithm is proposed, and it is proved that the convergence time of this algorithm is shorter than that of the classical consensus algorithm. Then, based on the improved consensus algorithm, a distributed control strategy for the energy storage system is proposed, one which reasonably adjusts the power of each energy storage unit to maintain the stability of the DC bus voltage and avoid over-charge and over-discharge of energy storage batteries. This strategy has two operational modes applicable to the conditions with and without disturbance respectively. This reduces the amount of communication and computation required for control while adjusting the power of the energy storage unit in a timely fashion. Finally, a simulation example of an isolated DC microgrid system is constructed, and the simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy and its superiority in control time.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51577068).

Key words: DC microgrid; energy storage; distributed control; consensus algorithm; droop control

0 引言

随着电网新能源渗透率的提高, 微电网因便于消纳新能源的特点受到广泛的关注并得到快速的发展^[1-5]。微电网能够运行于并网模式和孤岛模式, 增

强了电网的灵活性和可靠性^[6-8]。孤岛模式下, 微电网依靠储能装置维持内部的功率平衡, 实现自治, 是解决海岛等偏远地区供用电的有效途径^[9-10]。直流微电网避免了冗余的 DC/AC 转换过程, 相比交流微电网效率更高^[11], 并且不需要考虑无功潮流、同步、谐波电流等问题^[12]。

储能单元(energy storage unit, ESU)由储能电池及其本地控制器组成, 其对最大化新能源消纳和提

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577068); 国网江西省电力有限公司科技项目资助(SGJXGFZYXJS2250028)

高微电网可靠性尤为重要^[13]。多个储能单元构成一个储能系统(energy storage system, ESS)^[14]。当直流微电网处于孤岛模式时, 储能系统的运行目标通常是将所有母线的电压维持在额定值附近^[15]。同时, 若不计网损, 储能系统的输出功率应等于负载功率与可再生能源及其他机组输出功率之差^[16]。而所需的储能系统输出功率如何合理地分配给各储能单元, 以避免储能单元过充过放缩短其使用寿命就成为另一个需要解决的问题。因此, 在储能系统中采用的控制策略有两个目标: 稳定所有母线的电压和合理地将储能系统的功率分配给所有储能单元^[17-18]。

分层控制策略经常用于微电网中储能单元的控制^[19-20]。下层通常是下垂控制, 每个储能单元彼此不交换信息^[21], 储能单元和直流母线之间的线路阻抗差异导致下垂控制精度较低^[22]。上层为集中式或分布式二次控制, 用于提高控制的精度和性能^[23]。对于集中式控制, 一旦中央控制器发生故障, 所有储能单元都将失去控制。因此, 集中式控制的鲁棒性不足^[24]。相比之下, 分布式控制不依赖于中央控制器, 通过多个本地控制器的协作来实现控制目标, 与集中式控制相比具有更强的鲁棒性^[25]。并且所有本地控制器的地位是对等的, 当投入或退出某一个本地控制器时, 分布式控制依然有效, 这意味着分布式控制是支持即插即用的^[26]。

对于分布式控制, 如果任何一个储能单元与所有其他储能单元交换信息, 当有大量储能单元时, 通信拓扑非常复杂, 这可能会导致更高的通信成本和通信故障概率^[27]。在保证可以实现控制目标的情况下, 一致性算法^[28]使任何储能单元能够仅与相邻储能单元通信。每个储能单元的本地控制器是一个智能体, 多个智能体组成一个多智能体系统。为了达到控制目标, 每个智能体与其他相邻的智能体交换信息, 并根据一致性算法更新自己的数据, 从而极大地简化了通信拓扑。因此, 许多学者开展了基于一致性算法的储能单元分布式控制研究^[29-30]。文献[31]提出了一种基于多智能体滑模控制的储能单元荷电状态(state of charge, SOC)均衡控制策略。初始SOC越高的储能单元输出功率越高, 初始SOC越低的储能单元输出功率越低。文献[32]通过动态改变参考频率来实现交流微电网中分布式储能单元的SOC平衡。实验表明, 该策略具有良好的即插即用性能。文献[33]提出了一种交流微电网中储能单元的控制策略, 通过改变下垂电阻来调节储能单元的放电速率, 建立了非线性状态空间模型来分析所提策略的稳定性。

已有研究没有充分考虑一致性算法收敛时间对

控制策略可靠性的影响。虽然一致性算法使得通信拓扑稀疏, 减轻了通信压力, 但随之而来的问题是控制速度的降低。一致性算法在保证精度的情况下收敛时间越短, 储能系统越可靠^[34]。因此, 在研究基于一致性算法的储能单元分布式控制时, 需要解决的关键问题之一是分析和缩短一致性算法的收敛时间。否则, 控制策略的可靠性得不到保证。然而, 以往的研究只通过仿真和实验验证了一致性算法的收敛时间是可以接受的, 但并未从理论推导角度进行证明^[35]。本文提出了一种改进的一致性算法, 并通过理论推导证明所提算法能在有限时间内收敛, 且收敛时间比经典一致性算法收敛时间更短。另外, 为了减少所提出的控制策略所需的通信量和计算量, 在直流微电网没有扰动的前提下, 二次控制暂停了信息交换和改进一致性算法的运行。这有助于缓解通信压力, 节省本地控制器的计算量。

综上所述, 本文提出了一种基于改进一致性算法的储能系统分布式控制策略。主要贡献概括如下:

- 1) 所提出的控制策略动态调整每个储能单元的输出功率, 不仅改善了母线电压质量, 而且避免了储能单元的过充过放, 减少了电池寿命损耗, 提高了直流微电网的稳定性。
- 2) 提出了一种改进一致性算法, 并通过理论推导证明了该算法可以缩短收敛时间。将该算法应用于所提出的控制策略, 提高了所提策略的可靠性与实用性。
- 3) 提出了二次控制策略。在直流微电网无扰动的情况下, 暂停信息交换和改进一致性算法的运行, 从而减少控制所需的通信量和计算量。同时, 监视扰动情况, 当扰动发生时, 则快速启动改进一致性算法控制策略。

1 储能系统建模

直流微电网拓扑如图1所示。由于光伏发电难以提供稳定的功率输出, 因此有必要配备ESU, 特别是在孤岛模式下。多个ESU通过DC/DC转换器

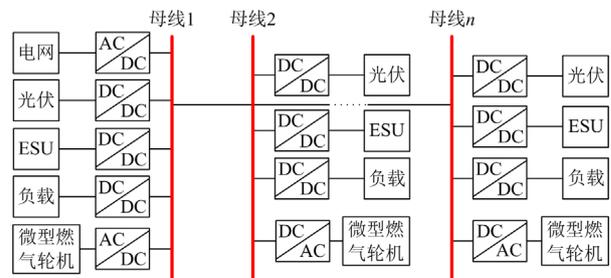


图1 直流微电网拓扑

Fig. 1 DC microgrid topology

连接到不同的直流母线上, 形成 ESS。每个 ESU 由一个储能电池和相应的本地控制器组成。ESS 在平衡新能源功率波动、维护直流微电网稳定方面发挥着重要作用。电池的输出电压一般小于母线电压。因此, 电池通过 DC/DC 转换器连接到母线上。微型燃气轮机为可控机组, 在孤岛模式下, 当光伏和储能难以支撑负荷时使用微型燃气轮机供电。

连接第 i 个储能电池的 DC/DC 转换器的模型如图 2 所示。 U_{bi} 是电池的输出电压, U_{oi} 是转换器的输出电压, U_{Bi} 是母线电压。由于线路电阻 r_i 的存在, U_{Bi} 和 U_{oi} 的值不相等。 I_{bi} 是电池的输出电流, I_{oi} 是转换器的输出电流。信号 d_i 是本地控制器下垂控制输出的 PWM 信号。信号 d_i 通过非门获得信号 \bar{d}_i , 信号 d_i 和 \bar{d}_i 控制 DC/DC 转换器中 IGBT 的通断。

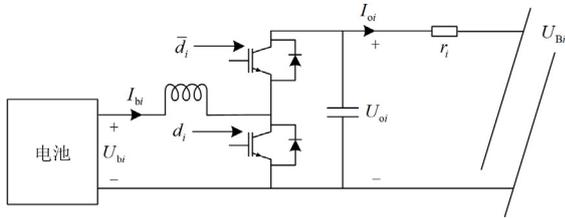
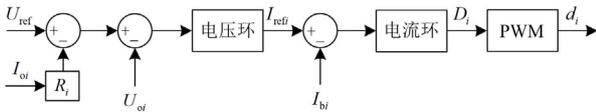


图 2 DC/DC 转换器模型

Fig. 2 Model of DC/DC converter

下垂控制简单可靠, 无须通信, 通常用作 ESU 本地控制器的一次控制^[1]。储能单元 i 的下垂控制结构如图 3 所示。 R_i 是虚拟下垂电阻, 通常与电池容量成反比。如果没有二次控制来动态改变 R_i , 则 R_i 为常量。 U_{ref} 是参考电压, 通常设置为直流母线电压的额定值。电压环和电流环包含比例和积分环节^[22]如式(1)一式(2)所示。

图 3 储能单元 i 的下垂控制结构Fig. 3 Droop control structure of ESU i

$$I_{refi} = \left(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s} \right) (U_{ref} - I_{oi}R_i - U_{oi}) \quad (1)$$

$$D_i = \left(K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} \right) (I_{refi} - I_{bi}) \quad (2)$$

式中: I_{refi} 为电压环的输出信号; D_i 为电流环的输出信号; K_{p1} 和 K_{i1} 分别为电压环的比例系数和积分系数; K_{p2} 和 K_{i2} 分别为电流环的比例系数和积分系数。

在 U_{oi} 和 I_{oi} 达到稳定后, 母线电压和输出电流

满足式(3)和式(4)^[14]。

$$U_{Bi} = U_{ref} - I_{oi}(R_i + r_i) \quad (3)$$

$$\frac{I_{oi}}{I_{oj}} = \frac{R_j + r_j}{R_i + r_i} \quad (4)$$

因此, 当以 U_{ref} 作为额定电压时, U_{Bi} 小于额定电压, 可见母线电压控制精度不足。在忽略线路电阻的情况下, 下垂控制可以实现 ESU 的输出电流与下垂电阻成反比。但由于线路电阻的存在, 下垂控制对输出电流的控制精度也不够高。为了提高母线电压质量, 合理、准确地分配 ESS 的输出功率, 提出了一种基于改进一致性算法的分布式控制策略, 它不仅改善了母线电压质量, 而且避免了 ESU 的过充过放。

2 改进一致性算法

2.1 图论

分布式控制是指多个智能体通过局部通信相互协作, 根据目标需求改变自身状态, 共同完成整个复杂任务^[9]。智能体(agent)是一种能够独立思考并与外界交互的实体或软件。由多个智能体组成的系统称为多智能体系统(multi-agent system, MAS)^[36]。在本文中, ESU 被视为一个智能体。多个 ESU 所组成的 ESS 是一个多智能体系统。

MAS 的通信拓扑用无向连通图 G 来描述, 并且 $G = \{V, E, A\}$ 。若 MAS 具有 n 个智能体, 节点集 $V = \{1, 2, \dots, n\}$, n 表示节点个数。本文假定每个节点都安装有 ESU, 则每个节点代表一个智能体。边集 $E = \{(i, j) \in V \times V\}$, (i, j) 表示节点 i 与节点 j 相邻, 并且它们之间存在通信信道。对于节点 i , 邻居集 $N_i = \{j \in V \mid (i, j) \in E\}$ 。邻接矩阵 A 是 n 阶矩阵, $A = \{a_{ij}\}$, a_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的连接权重, A 由式(5)所示的 Metropolis 方法^[37]得到。拉普拉斯矩阵 $L = \{l_{ij}\}$, l_{ij} 表达式如式(6)所示。

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\max(n_i, n_j) + 1} & j \in N_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} \frac{1}{\max(n_i, n_j) + 1} & i = j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中, n_i 和 n_j 分别是节点 i 和节点 j 的相邻节点数。

$$l_{ij} = \begin{cases} -a_{ij} & i \neq j \\ \sum_{j \in N_i} a_{ij} & i = j \end{cases} \quad (6)$$

对于无向连通图, 拉普拉斯矩阵是半正定的, 拉普拉斯矩阵的 n 个特征值 $\lambda_1(L), \lambda_2(L), \dots, \lambda_n(L)$

满足式(7)。

$$\lambda_1(\mathbf{L}) < \lambda_2(\mathbf{L}) \leq \dots \leq \lambda_n(\mathbf{L}), \lambda_1(\mathbf{L}) = 0 \quad (7)$$

经典的一致性算法可以表示为^[22]

$$x'_i = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i - x_j), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

只要 ESS 的通信拓扑包含生成树, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 式(8)满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t) - x_j(t)| = 0$ ^[22]。如果 G 的一个子图包含 G 的所有节点的树, 则该子图是 G 的生成树。因此, 本文设计了 ESS 的通信拓扑, 如图 4 所示。该通信拓扑可以保证在任意两个 ESU 之间发生通信故障或任何 ESU 因故障而停止工作时仍有生成树, 具有很高的可靠性。ESU 平等协作, 每个 ESU 具有相同的优先级, 满足了直流微电网对 ESU 即插即用的要求。

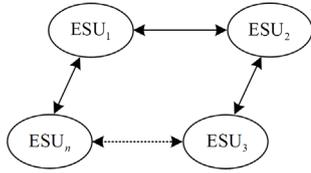


图 4 ESS 的通信拓扑

Fig. 4 Communication topology of ESS

2.2 缩短收敛时间的改进一致性算法设计

对于包含 n 个智能体的多智能体系统, 状态变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 控制输入 $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$, 它们的关系如式(9)所示^[33]。

$$\mathbf{x}' = \mathbf{u} \quad (9)$$

一致性是指多智能体系统中的各个智能体在控制算法的指导下, 通过局部通信和协作, 达到共同的一致状态^[17]。一致性的关键是设计合适的一致性算法, 使所有智能体的状态趋于相同的值。在多智能体系统的分布式控制中, 收敛速度是评价一致性算法的重要指标之一。在式(8)条件下, 当时间趋于无穷大时, 每个智能体的状态可以达到一个相同值。然而在实际应用中, 收敛时间要求往往比较苛刻。所有智能体的状态都要求在有限的时间内达到一致。经典一致性算法有时难以满足实际需求, 因此本文设计了一种能够在有限时间内收敛的改进一致性算法, 该算法的收敛速度快于经典的一致性算法。

改进的一致性算法可以表示为

$$x'_i = - \left[\frac{1}{\lambda_2(T + t_0 - t)} + 1 \right] \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i - x_j) \quad (10)$$

式中: $t \in [t_0, t_0 + T)$; λ_2 是 \mathbf{L} 的最小非零特征值; t_0 是初始时刻; T 是收敛时间。

在改进的一致性算法下, 所有智能体的状态在 T 内达到一致, 证明如下。

引理 1^[38] 设 \mathbf{J} 为 n 维单位向量。对于无向连通图 G , 若有 $\mathbf{J}\mathbf{x} = 0$, 则可得得不等式(11)。

$$\mathbf{x}^T \mathbf{L}\mathbf{x} \geq \lambda_2(\mathbf{L}) \mathbf{x}^T \mathbf{x} \quad (11)$$

引理 2^[39] 对于能够达成一致的多智能体系统, 如果 $\mathbf{x}' = -\mathbf{L}\mathbf{x}$, 则 \mathbf{L} 的最小非零特征值 $\lambda_2(\mathbf{L})$ 是 \mathbf{L} 的代数连通度, 反映收敛速度的下界。收敛的速度与之呈正相关。

智能体 i 的状态误差为

$$\delta_i(t) = x_i(t) - x^* \quad (12)$$

式中, $x_i(t)$ 表示第 i 个智能体的状态变量。

$$x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) \quad (13)$$

Lyapunov 函数如式(14)所示。

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \delta_i^2(t) \quad (14)$$

式中, $\delta_i(t)$ 表示第 i 个智能体的状态误差。

显然 $V(t) \geq 0$, 并且, 当且仅当 $\delta(t) = 0$ 时, $V(t) = 0$ 成立, 通过式(10), 可得

$$\sum_{i=1}^n x'_i(t) = 0 \quad (15)$$

因此可以推导出 x^* 是一个常量。然后结合式(12), 得到

$$\delta'_i(t) = x'_i(t) \quad (16)$$

$$\mathbf{J}\delta(t) = 0 \quad (17)$$

$$\delta_i(t) - \delta_j(t) = x_i(t) - x_j(t) \quad (18)$$

式中: $\mathbf{J} = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times n}^T$; $\delta(t)$ 表示多智能体系统状态误差。

为便于书写, 下文书写时忽略各函数的自变量 t , 即 $V(t)$ 记为 V , $x(t)$ 记为 x , $\delta(t)$ 记为 δ , 依此类推。

结合式(10)、式(16)一式(18)并利用引理 1, 得到

$$\begin{aligned} V' &= \delta^T \delta' = \delta^T \mathbf{x}' = - \left[\frac{1}{\lambda_2(T + t_0 - t)} + 1 \right] \delta^T \mathbf{L}\delta \leq \\ &- \lambda_2 \left[\frac{1}{\lambda_2(T + t_0 - t)} + 1 \right] \delta^T \delta = -2 \frac{1}{T + t_0 - t} V - 2\lambda_2 V \end{aligned} \quad (19)$$

显然 $V' < 0$, 式(19)可以写成

$$V' \leq -2 \frac{\alpha'}{\alpha} V - 2\lambda_2 V \quad (20)$$

式中

$$\alpha(t) = \frac{T}{T + t_0 - t} \quad (21)$$

式(20)等号左右两边同时乘以 α^2 , 得

$$\alpha^2 V' \leq -2\alpha\alpha' V - 2\lambda_2 \alpha^2 V \quad (22)$$

对 $\alpha^2 V$ 求导, 得

$$\frac{d(\alpha^2 V)}{dt} = \alpha^2 V' + 2\alpha\alpha'V \leq -2\lambda_2(\alpha^2 V) \quad (23)$$

通过解微分不等式(23)可得

$$\alpha^2 V \leq e^{-2\lambda_2(t-t_0)} \alpha^2(t_0) V(t_0) = e^{-2\lambda_2(t-t_0)} V(t_0) \quad (24)$$

式(24)两边同时除以 α^2 得

$$V \leq \alpha^{-2} e^{-2\lambda_2(t-t_0)} V(t_0) = \left(\frac{T+t_0-t}{T} \right)^2 e^{-2\lambda_2(t-t_0)} V(t_0) \quad (25)$$

由式(25)得

$$\|\delta\| \leq \frac{T+t_0-t}{T} e^{-\lambda_2(t-t_0)} \|\delta(t_0)\| \quad (26)$$

根据式(25), $\lim_{t \rightarrow (t_0+T)} V = 0$ 。由于 V 是正定的,

并且 V' 是负定的, 根据 Lyapunov 稳定性定理^[39], 多智能体系统是稳定的, 并且收敛时间为 T 。

下面证明控制输入是有界的。结合式(9)、式(10)、式(18)、式(26), 有:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{u}\| &= \left[\frac{1}{\lambda_2(T+t_0-t)} + 1 \right] \|\mathbf{Lx}\| = \left[\frac{1}{\lambda_2(T+t_0-t)} + 1 \right] \|\mathbf{L}\delta\| \leq \\ &\left[\frac{1}{\lambda_2(T+t_0-t)} + 1 \right] \|\mathbf{L}\| \|\delta\| \leq \\ &\left[\frac{1}{\lambda_2(T+t_0-t)} + 1 \right] \|\mathbf{L}\| \left[\frac{T+t_0-t}{T} e^{-\lambda_2(t-t_0)} \|\delta(t_0)\| \right] = \\ &\left(\frac{1}{\lambda_2 T} + \frac{T+t_0-t}{T} \right) e^{-\lambda_2(t-t_0)} \|\mathbf{L}\| \|\delta(t_0)\| \end{aligned} \quad (27)$$

显然 $\|\mathbf{u}\|$ 是 t 的减函数。当 $t = t_0$ 时, $\|\mathbf{u}\|$ 具有最大值如式(28)所示。

$$\|\mathbf{u}\|_{\max} = \left(\frac{1}{\lambda_2 T} + 1 \right) \|\mathbf{L}\| \|\delta(t_0)\| \quad (28)$$

经典的一致性算法可以用矩阵形式表示为

$$\mathbf{u} = -\mathbf{Lx} \quad (29)$$

改进的一致性算法也可以用矩阵形式表示为

$$\mathbf{u} = - \left[\frac{1}{\lambda_2(T+t_0-t)} + 1 \right] \mathbf{Lx} = -\mathbf{L}'\mathbf{x} \quad (30)$$

然后, 可以推导出如式(31)所示的不等式。

$$\lambda_2(\mathbf{L}') = \left[\frac{1}{\lambda_2(T+t_0-t)} + 1 \right] \lambda_2(\mathbf{L}) > \lambda_2(\mathbf{L}) \quad (31)$$

根据引理 2, 在相同的通信拓扑下, 改进的一致性算法比经典的一致性算法具有更快的收敛速度。这是由于控制增益 G_c 的应用, $G_c = \left[\frac{1}{\lambda_2(T+t_0-t)} + 1 \right]$ 。

当 $t \rightarrow t_0 + T$ 时, G_c 趋向于无穷大, 但是式(27)证明

控制输入 \mathbf{u} 是有界的, 因为当 $t \rightarrow t_0 + T$ 时, $\mathbf{Lx} \rightarrow \mathbf{0}$ 。然而, 一旦有测量误差存在, 导致 \mathbf{Lx} 不趋于 0, \mathbf{u} 将是无穷的。将控制增益中的 T 设置得略大于实际收敛时间可以解决这个问题, 如式(32)所示, 其中 $T' > T$ 。

$$G_c = \left[\frac{1}{\lambda_2(T'+t_0-t)} + 1 \right], t \in [t_0, t_0 + T] \quad (32)$$

这种方法牺牲了一些收敛精度, 但它防止了 \mathbf{u} 在 $t \rightarrow t_0 + T$ 时趋于无穷。通过选择相同的 Lyapunov 函数并遵循相同的证明步骤, 仍然可以得到

$$\|\delta\| \leq \frac{T'+t_0-t}{T'} e^{-\lambda_2(t-t_0)} \|\delta(t_0)\| \quad (33)$$

因此 $\|\delta\|$ 仍然随着时间的推移而减少, 尽管 $\|\delta(t)\|$ 不会收敛到 0, 但它会收敛到一个 0 的小邻域。根据式(28), 改进一致性算法的收敛时间不能设置得过小, 防止控制输入在初始时刻非常大。这种现象在基于高增益的控制方法中经常存在。

2.3 改进一致性算法有效性验证

为了验证改进一致性算法的收敛速度比经典一致性算法快, 在由 3 个智能体组成的多智能体系统上进行了仿真实验。多智能体系统的通信拓扑如图 4 所示。第一组初始状态 $\mathbf{x}_1 = [-5, 2, 3]^T$, 第二组初始状态 $\mathbf{x}_2 = [50, -80, -60]^T$ 。使系统在式(8)所示的经典一致性算法下运行 1 次, 并在式(10)所示的改进一致性算法下运行 3 次, 运行时分别将式(10)中的 T 设置为 4 s、2 s 和 1 s, 各个智能体的状态如图 5 和图 6 所示。状态误差如图 7 所示。

可见, 改进一致性算法的收敛速度明显快于经典一致性算法。改进一致性算法的收敛时间为 T 值,

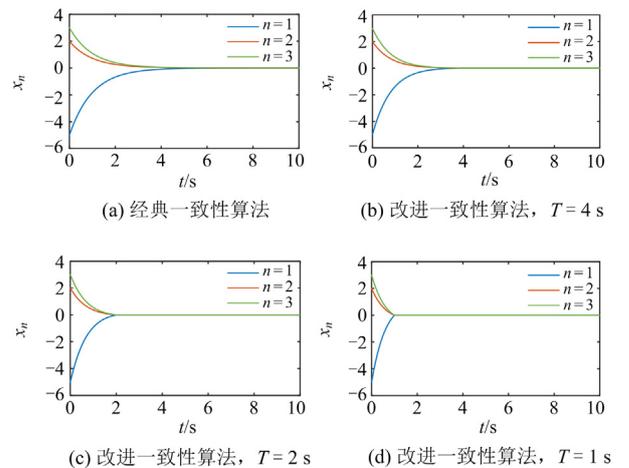


图 5 第一组初始状态下各智能体的状态

Fig. 5 State of agents of initial state in the first group

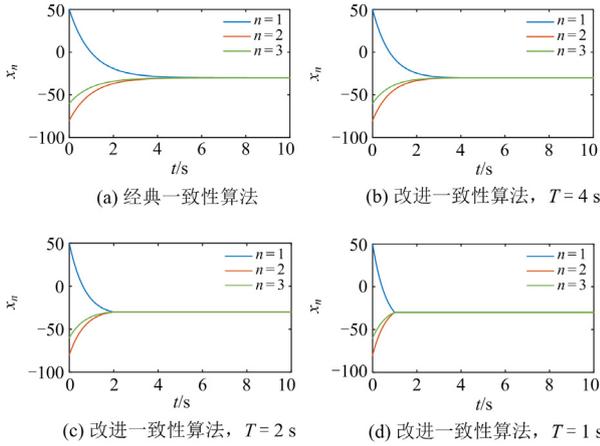


图 6 第二组初始状态下各智能体的状态

Fig. 6 State of agents of initial state in the second group

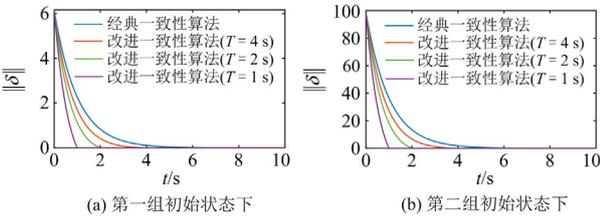


图 7 状态误差

Fig. 7 State errors

不受初始状态的影响。值得注意的是，改进一致性算法在达到收敛后退出运行，这有助于减少控制所需的通信量和计算量。因此，减小 T 值可以提高收敛速度，进一步减少通信量和计算量。但是，如 2.2 节所述，不能将 T 设置为过小的值。根据式(28)，在实际系统中， T 的最小值取决于控制输入的范围、通信拓扑和最差初始状态。在使用该算法时，有必要选择一个合理的 T 值。

3 基于改进一致性算法的 ESS 分布式控制策略

为了保证母线电压稳定的前提下解决电池过充过放问题，提出一种基于改进一致性算法的 ESS 分布式控制策略，其框图如图 8 所示。ESU_{*i*} 通过稀疏的通信网络与相邻的 ESU_{*j*} ($j \in N_i$) 交换电气信息。由二次控制输出 ΔU_i ，该二次控制采用改进一致性算法来缩短收敛时间。

$$\Delta U_i = \Delta U_{S_i} + \Delta U_{V_i} \quad (34)$$

式中： ΔU_{S_i} 是 SOC 补偿量，作用为调节电池的 SOC； ΔU_{V_i} 是电压补偿量，作用为将母线电压稳定在额定值左右。

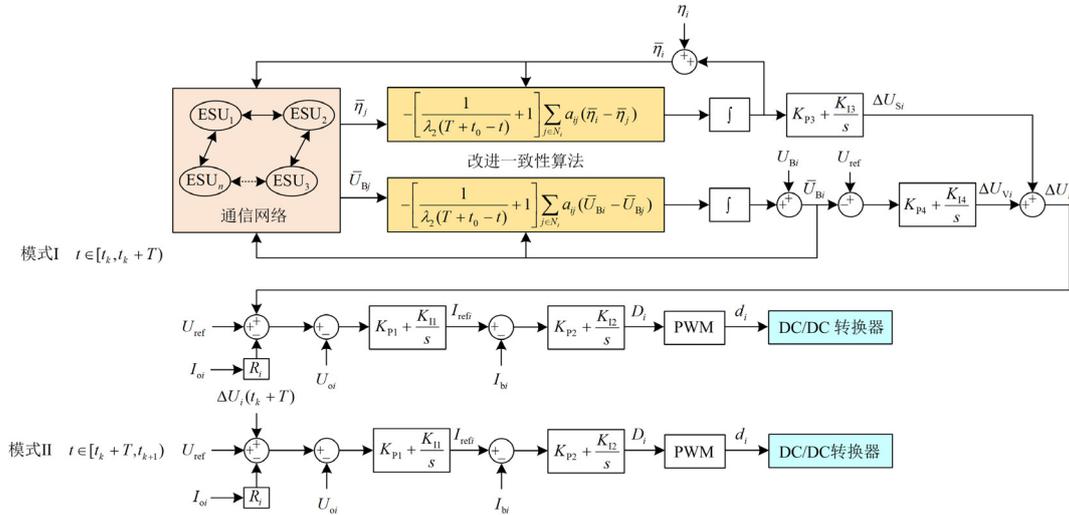


图 8 基于改进一致性算法的 ESS 分布式控制策略框图

Fig. 8 Block diagram of distributed control strategy of ESS based on improved consensus algorithm

所提出的控制策略使用第 1 节中提到的下垂控制作为一次控制， ΔU_i 是下垂控制的输入之一。下面详细说明二次控制的目标和实现过程。

3.1 二次控制的目标

SOC 为电池剩余电量与总容量之比，取值为 $[0, 1]$ ，按按时积分法可得

$$S_i = S_{i0} - \frac{1}{C_i} \int I_{bi} dt \quad (35)$$

式中： S_i 是 ESU_{*i*} 的 SOC； S_{i0} 是 ESU_{*i*} 的初始 SOC； C_i 是 ESU_{*i*} 的容量； I_{bi} 是 ESU_{*i*} 的电池的输出电流，当电池放电时 $I_{bi} > 0$ ，当电池充电时 $I_{bi} < 0$ 。

当 $S_i = 0$ 时, 表示电池已完全放电, 没有剩余电量。当 $S_i = 1$ 时, 表示电池已完全充电。为了使 ESS 保持良好的输出特性, 延长电池的使用寿命, 电池不宜完全放电和充电。当电池放电时 SOC 有下限, 当电池充电时 SOC 有上限。因此, 电池的可用容量如式(36)所示。

$$C_{Ai} = \begin{cases} C_i(S_i - S_L) & I_{bi} > 0 \\ C_i(S_H - S_i) & I_{bi} < 0 \end{cases} \quad (36)$$

式中: C_{Ai} 是 ESU_i 的可用容量; S_L 是放电时 SOC 的下限; S_H 是充电时 SOC 的上限。

当 ESS 运行时, 多个 ESU 的可用容量可能不同。如果 ESS 的输出功率没有合理地分配给所有 ESU, 则某些 ESU 可能会过度放电或过度充电。这意味着一些 ESU 的 SOC 可能会超过下限或上限, 而其他 ESU 仍有一定的可用容量。为了避免这种情况, 所提出的控制策略根据每个 ESU 的可用容量来分配 ESS 的输出功率。状态变量 $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]^T$ 定义如式(37)所示。

$$\eta_i = \frac{P_{oi}}{C_{Ai} U_{bi}} \quad (37)$$

式中, P_{oi} 是 ESU_i 的输出功率, $P_{oi} = U_{oi} I_{oi}$ 。

若式(38)成立, 则可以解决储能电池的过充过放问题, 证明如下。

$$\eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_n \quad (38)$$

对于任何两个 ESU, ESU_i 和 ESU_j, 有

$$\eta_i = \eta_j \quad (39)$$

设 $\eta_i = \eta_j = \eta^*$, 根据式(37), 忽略 DC/DC 转换器的功率损耗, 可以得到

$$I_{bi} = \frac{P_{oi}}{U_{bi}} = \eta^* C_{Ai} \quad (40)$$

$$I_{bj} = \frac{P_{oj}}{U_{bj}} = \eta^* C_{Aj} \quad (41)$$

式中: I_{bi} 是 ESU_i 的储能电池输出电流; I_{bj} 是 ESU_j 的储能电池输出电流。

设 Δt 为一个极短的时间段, 由式(40)和式(41), 有

$$C_{Ai}(t + \Delta t) = C_{Ai}(t) - \int_t^{t+\Delta t} |I_{bi}(t)| dt = \quad (42)$$

$$C_{Ai}(t) - \Delta t |I_{bi}(t)| = [1 - \Delta t |\eta^*|] C_{Ai}(t)$$

$$C_{Aj}(t + \Delta t) = C_{Aj}(t) - \int_t^{t+\Delta t} |I_{bj}(t)| dt = \quad (43)$$

$$C_{Aj}(t) - \Delta t |I_{bj}(t)| = [1 - \Delta t |\eta^*|] C_{Aj}(t)$$

基于式(42)、式(43), 可以得到

$$\frac{C_{Ai}(t + \Delta t)}{C_{Ai}(t)} = \frac{C_{Aj}(t + \Delta t)}{C_{Aj}(t)} \quad (44)$$

可见, 所有 ESU 能同时用完可用容量。电池不会过放电和过充电, 有助于延长电池寿命, 维持微电网的稳定。因此, 生成 ΔU_{Si} 的目标是使式(38)成立。新能源和负荷的功率波动会影响到母线电压质量, 因此有必要设法将母线电压维持在额定值附近。在如图 1 所示的多母线微电网中, 因为微电网面积小, 相邻的两个母线之间的距离很短, 所以相邻母线之间的线路电阻通常很小, 这使得多个母线的电压值相近。因此, 所提控制策略通过生成补偿量 ΔU_{Vi} 使母线电压的平均值维持在额定值, 即有式(45)成立。

$$\frac{\sum_{i=1}^n U_{Bi}}{n} = U_{ref} \quad (45)$$

式中, U_{ref} 是参考电压, 设置为母线电压的额定值。

3.2 二次控制的实现

二次控制有两种模式, 如图 8 所示。模式 I 和模式 II 之间的切换过程如图 9 所示。

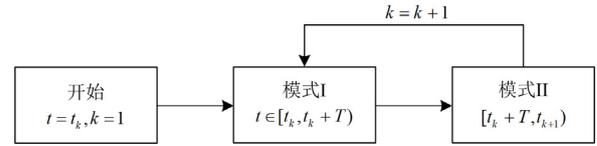


图 9 模式切换

Fig. 9 Mode switch

控制策略在 $t = t_k, k = 1$ 时开始运行。二次控制处于模式 I 的时间为改进一致性算法的收敛时间。根据图 8, ΔU_{Si} 为

$$\Delta U_{Si} = \left(K_{P3} + \frac{K_{I3}}{s} \right) (\bar{\eta}_i - \eta_i) \quad (46)$$

$$\bar{\eta}_i = \eta_i - \left[\frac{1}{\lambda_2(T + t_0 - t)} + 1 \right] \int \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{\eta}_i - \bar{\eta}_j) \quad (47)$$

式中, K_{P3} 和 K_{I3} 分别为生成 ΔU_{Si} 的比例系数和积分系数。

ΔU_{Si} 为下垂控制的输入, 起到调节输出功率 P_{oi} 的作用。 P_{oi} 的变化反过来调节 $\eta_i(t)$ 。如果 $\eta_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \eta_m(t)$ 成立, ΔU_{Si} 的数值为非零常数。

根据图 8, ΔU_{Vi} 为

$$\Delta U_{Vi} = \left(K_{P4} + \frac{K_{I4}}{s} \right) (U_{ref} - \bar{U}_{Bi}) \quad (48)$$

式中: K_{P4} 和 K_{I4} 分别为生成 ΔU_{Vi} 的比例系数和积

分系数。 \bar{U}_{Bi} 如式(49)所示。

$$\bar{U}_{Bi} = U_{Bi} - \left[\frac{1}{\lambda_2(T+t_0-t)} + 1 \right] \int \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{U}_{Bi} - \bar{U}_{Bj}) (49)$$

ΔU_{Vi} 同样为下垂控制的输入，可以调节 P_{oi} 。

P_{oi} 的变化反过来调节 U_{Bi} 。如果 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Bi} = U_{ref}$ 成立， ΔU_{Vi} 的数值为非零常数。

综上所述，基于第2节提出的改进一致性算法，可以得出

$$\lim_{t \rightarrow (t_k+T)} \eta_i = \lim_{t \rightarrow (t_k+T)} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \eta_m (50)$$

$$\lim_{t \rightarrow (t_k+T)} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Bi}(t) = U_{ref} (51)$$

在模式 I 中，ESS 的输出功率得到合理的分配，使得 η 达成一致，即式(38)成立，母线电压保持在额定值附近。二次控制改善了下垂控制的控制性能，但增加了控制所需的通信量和计算量。为了避免冗余通信，节省计算资源，二次控制在 $t = t_k + T$ 时从模式 I 切换到模式 II。在模式 II 中，停止相邻 ESU 之间的电气信息交换和改进一致性算法的运行。 $\Delta U_i(t)$ 的值保持为 $\Delta U_i(t_k + T)$ 的值。将二次控制中积分器的数据清零，以确保下次二次控制切换到模式 I 时积分器的初始数据为零。当多个母线的电压值仍接近额定值时，二次控制保持在模式 II。这意味着在 $t = t_k + T$ 后没有扰动发生，负载功率减去新能源及可控机组输出功率所得差值几乎不变，一旦式(52)成立，二次控制从模式 II 切换到模式 I，这意味着有扰动发生，上述差值发生了较大的变化，并且 $t = t_{k+1}$ 是式(52)成立的时刻，也是二次控制的切换时刻。

$$|U_{Bi} - U_{ref}| > \varepsilon U_{ref} (52)$$

式中， ε 是灵敏度系数，取值取决于母线电压质量的要求。

显然， $U_{Bi}(t)$ 是判断二次控制是否切换模式所需的唯一信息，并且是无需通信即可获得的本地信息，所需的计算量也很小。因此，使用式(52)作为模式切换的条件是简单可靠的。

如图8所示，当二次控制处于模式 I 时 ESU_i 通过稀疏通信网络从相邻 ESU 获得 $\bar{\eta}_j$ 和 \bar{U}_{Bj} ($j \in N_i$)，所提控制策略所需的其余电气信息在本地获得。假设每次通信可以将 $\bar{\eta}_j$ 和 \bar{U}_{Bj} ($j \in N_i$) 传递给 ESU_i ，则所提控制策略的通信次数如式(53)所示。

$$N_c = 2nf_c T_c (53)$$

式中： n 是 ESU 的数量； f_c 是通信频率； T_c 是二

次控制处于模式 I 的时间。

对于二次控制，模式 II 的计算量相比模式 I 小得多，因为模式 II 中的二次控制只判断切换到模式 I 的条件是否成立，没有其他的计算量。与连续运行改进一致性算法相比，模式切换可以大大减少二次控制所需的计算量。综上所述，所提出的控制策略只有在模式 I 时才需要相邻 ESU 之间的通信和改进一致性算法的运算。可再生能源和负荷的功率波动越小，处于模式 II 的时间越长，可以节省的通信量和计算量就越大。

4 仿真结果

4.1 仿真模型和参数

为了验证基于改进一致性算法的 ESS 分布式控制策略的有效性和优越性，在 Matlab/Simulink 中建立了包含 3 个 ESU 的孤岛直流微电网仿真模型，如图 10 所示。3 个 ESU 组成了 ESS，之间存在一个环状的通信网络。母线电压额定值为 400 V。光伏单元和 ESU 通过 DC/DC 转换器连接到母线。由于光伏单元处于最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式，直流微电网的功率平衡完全由 ESS 调节。所有 ESU 的容量都设置为 100 mAh，该容量较小，便于在较短时间内观察出可用容量的变化。所有负载均为阻性，ESS 处于放电状态。具体参数如表 1 所示。

4.2 所提控制策略的有效性

ESS 投运后，首先采用下垂控制策略，然后在 0.5 s 时应用所提控制策略，验证所提控制策略在改善输出功率分配和母线电压质量方面的有效性。投入 Load₁、Load₂ 和 Load₃。在初始时刻， ESU_1 、 ESU_2 和 ESU_3 的 SOC 分别为 0.8、0.7 和 0.6。改进一致性算法的收敛时间 T_1 设为 0.5 s。用相对极差 R_η 来表示 η 的分散程度并判断 η 是否达到一致，如式(54)所示。如果 R_η 接近于 0，说明 η_1 、 η_2 和 η_3 近似相等，达成一致。图 11 为所提控制策略在 0~1 s 之间的仿真结果。

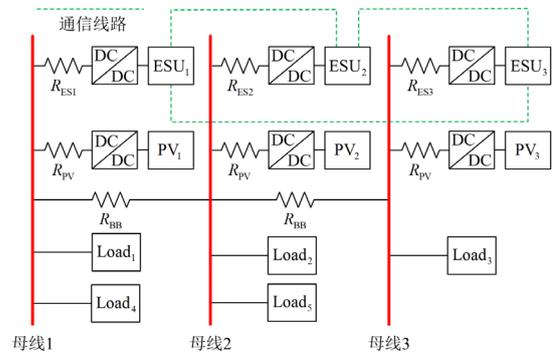


图 10 孤岛直流微电网模型

Fig. 10 Isolated DC microgrid model

表 1 孤岛直流微电网模型的参数

Table 1 Parameters of isolated DC microgrid model

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
额定母线电压 U_{BR}/V	400	R_{L2}/Ω	80	电池容量 C/mAh	100	K_{P2}	800
电池输出电压 U_b/V	200	R_{L3}/Ω	40	S_L	0.3	K_{P3}	1
虚拟下垂电阻 R/Ω	2	R_{L4}/Ω	60	S_H	0.9	K_{P4}	1
R_{ES1}/Ω	0.1	R_{L5}/Ω	100	S_{I0}	0.8	K_{I1}	800
R_{ES2}/Ω	0.2	母线对地电容 C_{BG}/F	4×10^{-5}	S_{20}	0.7	K_{I2}	300
R_{ES3}/Ω	0.3	转换器电容 C_C/F	4×10^{-5}	S_{30}	0.6	K_{I3}	50
R_{PV}/Ω	0.1	转换器电感 L_C/H	2×10^{-5}	收敛时间 T_1/s	0.05	K_{I4}	50
R_{BB}/Ω	0.1	载波频率 f_{car}/kHz	10	收敛时间 T_2/s	0.1	—	—
负载电阻 R_{L1}/Ω	120	光伏输出功率 P_{PV}/W	500	K_{P1}	10	—	—

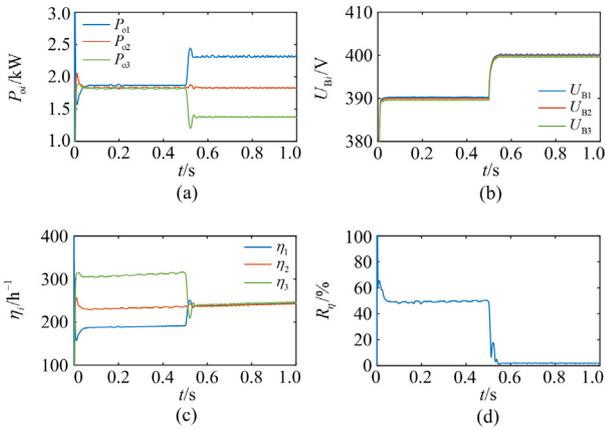


图 11 所提控制策略在 0~1 s 之间的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of the proposed control strategy between 0 and 1 s

$$R_{\eta} = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\bar{\eta}} \quad (54)$$

式中: η_{\max} 是 η_1 、 η_2 和 η_3 中的最大值; η_{\min} 是 η_1 、 η_2 和 η_3 中的最小值; $\bar{\eta}$ 是 η_1 、 η_2 和 η_3 的平均值。

在下垂控制策略中, 虚拟下垂电阻与 ESU 的容量成反比。因此, 虚拟下垂电阻全部设置为 2Ω 。这使得在 $0 \sim 0.5$ s 所有 ESU 的输出功率非常接近, 线路电阻的差异使它们不完全相等。然而, 这种输出功率分配可能会导致初始 SOC 最小的 ESU₃ 过放电。表 2 为 3 个 ESU 的可用容量 C_{A1} 、 C_{A2} 和 C_{A3} 分别在初始时刻、0.5 s、0.55 s、1 s 这 4 个时刻的值。在 $0 \sim 0.5$ s, 因为 $C_{A1} > C_{A2} > C_{A3}$, 所以 $\eta_1 < \eta_2 < \eta_3$ 。当微电网进入稳态后, R_{η} 约为 50%, 说明 η_1 、 η_2 和 η_3 的分散程度很大。母线电压平均值约为 390 V, 低于额定值 400 V, 可见下垂控制策略需要改善输出功率分配和母线电压质量。

所提控制策略在 0.5 s 后应用。在 0.5~0.55 s 处

于模式 I, η_1 、 η_2 和 η_3 达到一致, 母线电压平均值提高到 400 V。由于微电网中的光伏单元和负荷没有较大波动, 因此所提控制策略在 0.55~1 s 保持在模式 II, 输出功率保持不变, 式(38)和式(45)保持成立。根据表 2, ESU₁、ESU₂ 和 ESU₃ 在 0.5~1 s 的可用容量减少量分别为 1.5 mAh、1.2 mAh 和 0.9 mAh。可用容量最大的 ESU₁ 的减少量最大, 可用容量最小的 ESU₃ 的减少量最小, 可以避免 ESU₃ 的过放电。因此, 所提出的控制策略可以有效地改善输出功率分配和母线电压质量。

表 2 各 ESU 的可用容量

Table 2 Available capacity of each ESU

参数	初始值	0.5 s 值	0.55 s 值	1 s 值
C_{A1}/mAh	50	48.8	48.7	47.3
C_{A2}/mAh	40	38.8	38.7	37.6
C_{A3}/mAh	30	28.8	28.7	27.9

为了模拟负载的突变, 将 Load₄ 在 1.5 s 时接入微电网, Load₄ 为 60Ω 。将式(52)中的灵敏度系数 ε 设置为 5×10^{-3} 。1~2 s 的仿真结果如图 12 所示。在接入 Load₄ 之前, 所提出的控制策略保持在模式 II。根据第 3 节的分析, 模式 II 可以有效地减少控制所需的通信量和计算量。由于 Load₄ 的接入, 母线电压平均值迅速下降, 使得式(52)成立。因此, 所提控制策略在 1.5 s 时从模式 II 切换到模式 I。图 12(b)和图 12(d)表明, 1.55 s 时, 母线电压已恢复到额定值左右, η_1 、 η_2 和 η_3 再次达成一致。所提出的控制策略在 1.55 s 时从模式 I 切换到模式 II。再次对负荷突变进行模拟, 将 100Ω 的 Load₅ 在 1.5 s 时接入微电网, 没有接入 Load₄, 仿真结果如图 13 所示。在负载突变后的 0.05 s 时, η_1 、 η_2 和 η_3 依然达成了一致, 母线电压平均值依然恢复到了额定值。图 12 和图 13 所示的仿真结果均表明, 在负载突变后, η_1 、

η_2 和 η_3 在有限收敛时间 T_1 内重新达成一致, 即式 (38) 成立, 同时母线电压平均值在 T_1 内恢复到额定值, 即式 (45) 成立。因此, 模式 I 和模式 II 的相互切换可以确保 ESS 的输出功率在微电网受到干扰时及时变化以保持式 (38) 和式 (45) 成立。

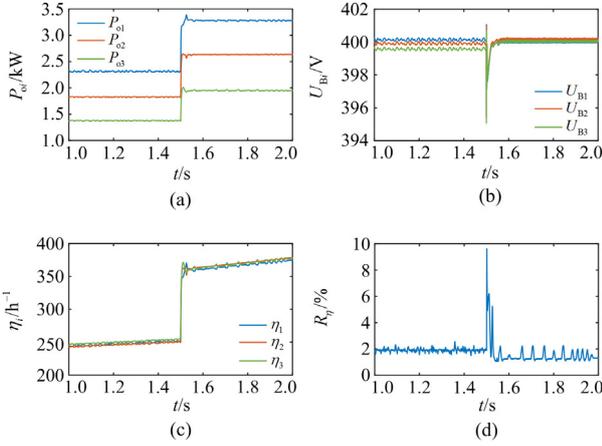


图 12 投入 Load₄时所提控制策略在 1~2 s 之间的仿真结果
Fig. 12 Simulation results of the proposed control strategy between 1 and 2 s when Load₄ is put in

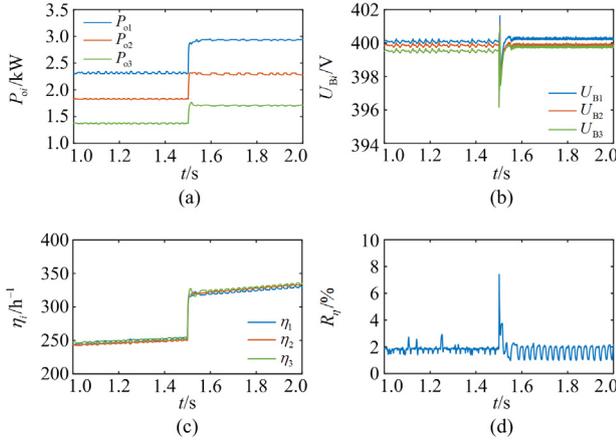


图 13 投入 Load₃时所提控制策略在 1~2 s 之间的仿真结果
Fig. 13 Simulation results of the proposed control strategy between 1 and 2 s when Load₃ is put in

4.3 控制时间的比较

将所提控制策略的收敛时间设为 T_2 , $T_2 = 0.1$ s, 比较不同收敛时间下的控制效果。仍然在 0.5 s 时应用所提控制策略, 负载、初始 SOC 等参数保持不变。仿真结果如图 14 所示。应用所提控制策略后, 3 个 ESU 的输出功率分别稳定于 2.3 kW、1.8 kW、1.3 kW, 这与图 11 所示的输出功率大小是相同的。母线电压平均值上升到了 400 V, 并且 η_1 、 η_2 和 η_3 达成一致, 这说明控制策略依然是有效的。根据 η 和 R_η 的结果

可以看出 η_1 、 η_2 和 η_3 达到一致所用时间在 0.1 s 以内, 并且长于 0.05 s, 这证明通过设置不同的改进一致性算法收敛时间能够有效调节控制所需时间。在一定的范围内, 收敛时间越短, 控制所需时间越短, 控制所需时间不超过收敛时间。但是如 2.2 节所述, 收敛时间不能设置得过短, 以防止控制输入在初始时刻过大。

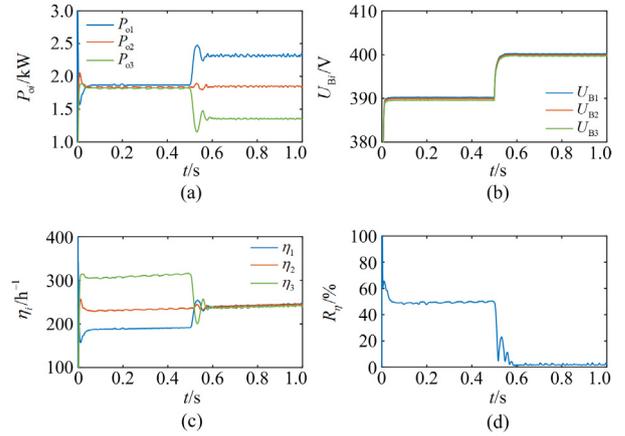


图 14 改变收敛时间的仿真结果
Fig. 14 Simulation results of changing convergence time

为了证明所提出的改进一致性算法在收敛时间方面相比经典一致性算法具有一定的优越性, 将所提控制策略中的改进一致性算法更换为经典一致性算法(如图 A1 所示)。相同的条件下, 在 0.5 s 应用基于经典一致性算法的控制策略, 仿真结果如图 15 所示。各电气量在 0.5 s 后的变化趋势和稳定后的数值与图 11 和图 14 的结果基本相同, 但 η_1 、 η_2 和 η_3 在 0.8 s 时才达成一致, 达成一致所用时间为 0.3 s。而在使用改进一致性算法的情况下, 两次仿真中达

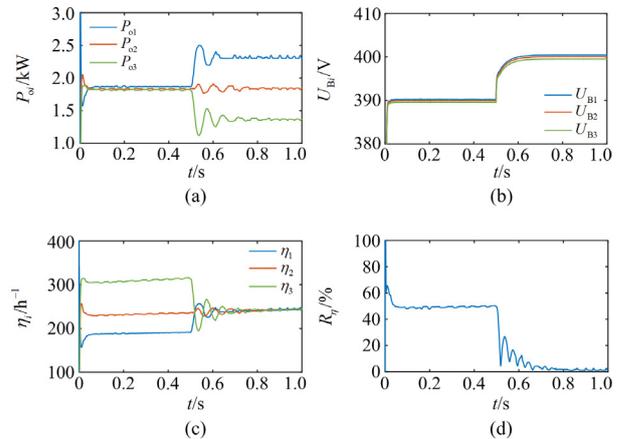


图 15 基于经典一致性算法的控制策略仿真结果
Fig. 15 Simulation results of control strategy based on conventional consensus algorithm

成一致所用时间分别为 0.05 s 和 0.1 s。可见, 改进一致性算法可以缩短达成一致所用时间, 有利于提高控制策略的可靠性。

5 结论

针对直流微电网中存在的储能单元过充过放和母线电压偏移的问题, 本文提出了基于改进一致性算法的储能系统分布式控制策略, 得到以下结论。

1) 采取分布式控制方法, 储能单元就地完成控制, 相比集中式控制具有更强的鲁棒性和灵活性。为交换电气信息, 构建稀疏通信网络, 储能单元仅与相邻单元通信, 降低通信压力。

2) 通过所提改进一致性算法调节储能单元的输出功率, 在改善母线电压质量的同时保证输出功率按照可用容量分配, 避免储能单元过充过放。理论推导和算例验证说明, 相比经典一致性算法, 改进一致性算法具有收敛时间较短的优势, 将其应用于储能系统的控制, 有效缩短了控制所需时间, 提高了控制策略的可靠性。

3) 通过两种控制模式的互相切换, 避免储能单元在无扰情况下进行冗余的通信和运行改进一致性算法, 减少控制所需的通信量和计算量。而如何减少控制在有扰情况下的通信量和计算量, 是下一步值得研究的方向。

附录A

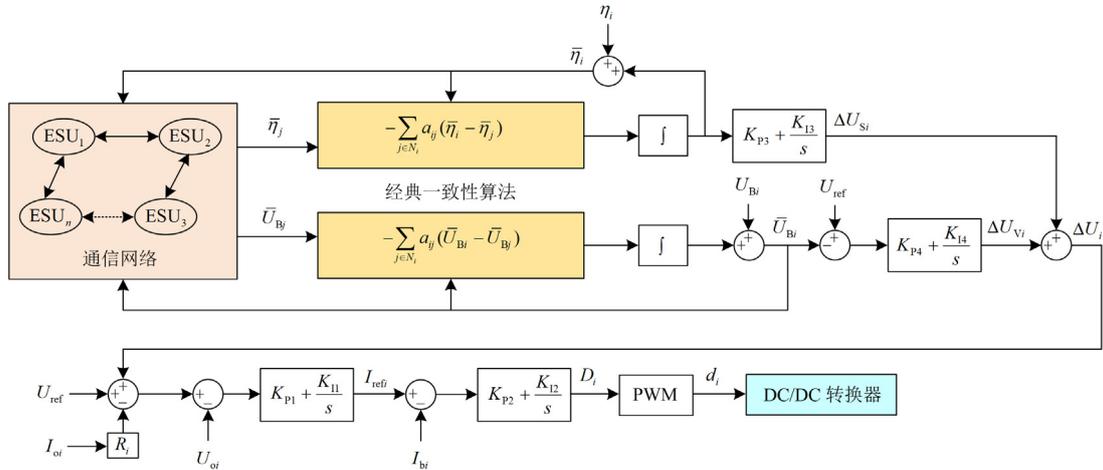


图 A1 基于经典一致性算法的 ESS 分布式控制策略框图

Fig. A1 Block diagram of distributed control strategy of ESS based on conventional consensus algorithm

参考文献

- [1] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84.
- [2] 刘晖, 雷勇, 朱英伟, 等. 微电网运行模式切换下储能变流器双无源控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 196-202.
LIU Hui, LEI Yong, ZHU Yingwei, et al. Dual-passivity-based control strategy for energy storage converter under microgrid operation mode switching[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 196-202.
- [3] 卢昕, 陈众励, 李辉. 基于自抗扰控制的直流微电网双向 Buck-Boost 变换器控制策略研究[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 193-200.
LU Xin, CHEN Zhongli, LI Hui. Research on control

- strategy of bidirectional buck-boost converter in dc microgrid based on active disturbance rejection control[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 193-200.
- [4] 周蔚, 粟时平, 苏杰, 等. 基于改进自耦比例积分的直流微电网母线电压控制[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 44-50.
ZHOU Wei, SU Shiping, SU Jie, et al. DC microgrid bus voltage control based on improved auto-coupling proportional-integral[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 44-50.
- [5] 苏适, 栾思平, 罗恩博, 等. 一种基于级联 Buck-Boost 变换器的多储能并联系统及其控制策略设计[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 70-76.
SU Shi, LUAN Siping, LUO Enbo, et al. A multi-storage parallel system based on cascaded Buck-Boost converter and its control strategy design[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 70-76.

- [6] VAHID M, SAJJAD G, EDRIS P, et al. A new hybrid control technique for operation of DC microgrid under islanded operating mode[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(4): 646-656.
- [7] 张天翼, 郑凯元, 王海风. 聚合相同分布式电源对直流微电网高频振荡稳定性的影响[J]. *中国电力*, 2021, 54(8): 103-108.
ZHANG Tianyi, ZHENG Kaiyuan, WANG Haifeng. Impact of large number of same aggregated distributed generators on the high-frequency oscillatory stability of a DC microgrids[J]. *Electric Power*, 2021, 54(8): 103-108.
- [8] 卢开诚, 刘铠诚, 董树锋. 基于模糊单神经元 PI 的微电网频率自适应控制[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(5): 131-139.
LU Kaicheng, LIU Kaicheng, DONG Shufeng. A microgrid frequency control method based on fuzzy single neuron adaptive PI control[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(5): 131-139.
- [9] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(17): 4397-4407.
LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. An adaptive droop control for the islanded DC microgrid based on discrete consensus algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17): 4397-4407.
- [10] LIN G, LIU J, ZHOU Y, et al. An inertia-emulation-based cooperative control strategy and parameters design for multi-parallel energy storage system in islanded DC microgrids[J]. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2022, 16(1): 4370-4385.
- [11] 张纯江, 暴云飞, 孟宪慧, 等. 直流微网储能 DC/DC 变换器的自适应虚拟直流电机控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(1): 12-20.
ZHANG Chunjiang, BAO Yunfei, MENG Xianhui, et al. Adaptive virtual DC machine control for a DC microgrid energy storage DC/DC converter[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(1): 12-20.
- [12] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, et al. Energy storage sharing in smart grid: a modified auction-based approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(3): 1462-1475.
- [13] 李鹏程, 张纯江, 袁然然, 等. 改进 SOC 下垂控制的分布式储能系统负荷电流分配方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(13): 3746-3754.
LI Pengcheng, ZHANG Chunjiang, YUAN Ranran, et al. Load current sharing method of distributed energy storage systems by improved SOC drooping control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3746-3754.
- [14] TAH A, DAS D. An enhanced droop control method for accurate load sharing and voltage improvement of isolated and interconnected DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(3): 1194-1204.
- [15] BI Kaitao, SUN Li, AN Quntao, et al. Active SOC balancing control strategy for modular multilevel super capacitor energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(5): 4981-4992.
- [16] CHEN Z, YU X, XU W, et al. Modeling and control of islanded DC microgrid clusters with hierarchical event-triggered consensus algorithm[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2021, 68(1): 376-386.
- [17] HOANG K D, LEE H. Accurate power sharing with balanced battery state of charge in distributed DC microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(3): 1883-1893.
- [18] XU Y, GUO Q, SUN H, et al. Distributed discrete robust secondary cooperative control for islanded microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3620-3629.
- [19] 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[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7): 61-69.
LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7): 61-69.
- [20] SAHOO S K, SINHA A K, KISHORE N K. Control techniques in AC, DC, and hybrid AC-DC microgrid: a review[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(2): 738-759.
- [21] 杨丘帆, 黄煜彬, 石梦璇, 等. 基于一致性算法的直流微电网多组光储单元分布式控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(12): 3919-3928.
YANG Qiufan, HUANG Yubin, SHI Mengxuan, et al. Consensus based distributed control for multiple PV-battery storage units in DC microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(12): 3919-3928.
- [22] ZIA M F, ELBOUCHIKHI E, BENBOUZID M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects[J]. *Applied Energy*, 2018, 222: 1033-1055.
- [23] MATHEW P, MADICHETTY S, MISHRA S. A multi-level control and optimization scheme for islanded PV based microgrid: a control frame work[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2019, 9(3): 822-831.
- [24] 米阳, 王晓敏, 钱翌明, 等. 考虑通信时延的直流微电网分布式储能单元协调控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 91-100.

- MI Yang, WANG Xiaomin, QIAN Yiming, et al. Coordinated control method of distributed energy storage units in a DC microgrid considering communication delay[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 91-100.
- [25] NASIRIAN V, MOAYEDI S, DAVOUDI A, et al. Distributed cooperative control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2288-2303.
- [26] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Distributed cooperative control of microgrid storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2780-2789.
- [27] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺. 适用于风电功率调控的复合储能系统及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 95-102.
- LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun. Hybrid energy storage system and its control strategies intended for wind power conditioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 95-102.
- [28] MORSTYN T, HREDZAK B, DEMETRIADES G D, et al. Unified distributed control for DC microgrid operating modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 802-812.
- [29] 龙本锦, 张靖, 何宇, 等. 基于 DMPC 和储能单元约束的分组一致性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 23-36.
- LONG Benjin, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Grouping consistency control strategy based on DMPC and energy storage unit constraints[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 23-36.
- [30] MORSTYN T, SAVKIN A V, HREDZAK B, et al. Multi agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4735-4743.
- [31] LI C, COELHO A A, DRAGICEVIC T, et al. Multi agent based distributed state of charge balancing control for distributed energy storage units in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2369-2381.
- [32] GUAN Y, MENG L, LI C, et al. A dynamic consensus algorithm to adjust virtual impedance loops for discharge rate balancing of AC microgrid energy storage units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4847-4860.
- [33] GHAZZALI M, HALOUA M, GIRI F. Fixed-time distributed voltage and reactive power compensation of islanded microgrids using sliding-mode and multi-agent consensus design[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(1): 232-240.
- [34] LIU W, GU W, XU Y, et al. Improved average consensus algorithm based distributed cost optimization for loading shedding of autonomous microgrids[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 73(1): 89-96.
- [35] KHANZADEH A, POURGHOLI M. Fixed-time leader-follower consensus tracking of second-order multi-agent systems with bounded input uncertainties using non-singular terminal sliding mode technique[J]. IET Control Theory Applications, 2018, 12(5): 679-686.
- [36] XU Y, LIU W. Novel multi-agent based load restoration algorithm for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 152-161.
- [37] LU M, LIU L. Cooperative output regulation of linear multi-agent systems by a novel distributed dynamic compensator[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(12): 6481-6488.
- [38] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [39] POLYAKOV A, FRIDMAN L. Stability notions and Lyapunov functions for sliding mode control systems[J]. Journal of Franklin Institute, 2014, 351(1): 1831-1865.

收稿日期: 2023-02-07; 修回日期: 2023-04-09

作者简介:

梁海峰(1976—), 男, 博士后, 副教授, 研究方向为新型输配电技术、微电网技术、新能源电力系统、人工智能在能源互联网中的应用等; E-mail: hfliang@ncepu.edu.cn

丁政(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网控制技术; E-mail: 1009444036@qq.com

李鹏(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统、综合能源系统、能源互联网与智能电网、人工智能在智慧能源中的应用等。E-mail: ncepulp@ncepu.edu.cn

(编辑 张颖)