

基于一致性算法的储能单元分布式优化调度策略

张晓花¹,王晓亮²,廖重阳¹,朱陈松³,李 瀚¹,刘 应¹,谈 天¹

(1. 常州大学 机械与轨道交通学院,江苏 常州 213164;2. 南京邮电大学 自动化学院,南京 210023;3. 常州大学 商学院,江苏 常州 213164)

Distributed scheduling strategy of energy storage unit based on consensus algorithm

ZHANG Xiaohua¹, WANG Xiaoliang², LIAO Chongyang¹, ZHU Chensong³, LI Han¹, LIU Ying¹, TAN Tian¹

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

3. Business School, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

摘要:随着新型储能技术的快速发展和产业化,集成海量储能单元,平抑可再生能源发电所引起的电网功率波动成为可能。但是大量储能单元分布分散,加之电池储能单元中内阻的存在会影响其存储效率,传统集中式调度难度很大。因此设计了一种基于多智能体一致性的考虑电池内阻的储能单元完全分布式优化调度策略。通过利用该完全分布式算法对储能单元进行实时功率分配来实现由风电并网引起的电网功率的平衡控制。通过仿真分析验证了分布式一致性算法的有效性和即插即用特性,对不同通信拓扑具有较好适用性。

关键词:多智能体;一致性算法;储能单元;分布式调度

Abstract: With the rapid development and industrialization of the new energy storage technology, smoothing the fluctuations of renewable power output by integrated mass storage unit becomes possible. Because of the allocation and internal resistance of battery energy storage system, a fully distributed optimization scheduling strategy based on multi-agent consensus algorithm which considered the internal resistance of the battery energy storage unit has been designed. By using a fully distributed algorithm, the power balance control of the power grid is realized by the real-time power allocation of the energy storage unit. The verification of each distributed strategy is realized through simulation analysis. The effectiveness and plug-and-play characteristic of the distributed consensus algorithm are verified by simulation results. The distributed consensus algorithm has good applicability for different communication topology.

Key words: multi-agent system; consensus algorithm; energy storage unit; distributed dispatch

0 引言

为实现节能减排,可再生能源发电在电力系统中的渗透率不断提高^[1]。可再生能源发电存在随机性、间歇性以及波动性等固有缺陷,会对电网产生冲击,严重时将引发大规模恶性事故。随着电池储能、超级电容储能、飞轮储能等新型储能技术的快速进步和产业化,通过调整储能系统的实时功率对可再生能源发电产生的功率波动进行平抑成为理论研究和工程应用的热点^[2-3]。

文献[4]提出了一种储能系统的集中调度方式,实现了光伏发电的及时消纳。文献[5]提出了用于调峰、调压、备用等面向多应用需求的分布式储能优化调度方法。文献[6]建立了由电池储能系统(battery energy storage system, BESS)和空调负荷群构成的虚拟储能系统来提高电力系统频率稳定性。

上述文献所提出的用储能系统调控策略实现储

能系统与发电侧及需求侧资源的优化运行,大都采用集中式的控制方法。然而配置海量储能单元电网的高复杂性使得集中式调度难度更大,问题如下:

① 储能单元的地理位置分散,很难获取全局和同步信息;② 集中式调度的低灵活性,很难满足系统对储能单元“即插即用”特性的要求;③ 信息在通信网络中快速流通,使得集中式调度稳定运行的通信成本非常高。相比之下,分布式调度仅需要局部信息交互就可实现对储能单元的实时功率分配,在灵活性、鲁棒性、通信成本等方面具有明显的优势。

分布式优化算法的一个基本问题就是所有的节点都要达到一致,多智能体系统的一致性算法能够应用于分布式调度,其基本思想是通过控制多智能体单元共同参与局部信息交互的方式传递全局控制信息。文献[3]应用“Leader-Follower”一致性算法实现储能单元的实时功率分配;文献[7]提出一种基于多智能体一致性算法的储能单元分布式协同控制策略;文献[8]基于一致性理论实现了独立微电网动态经济调度;文献[9]提出了一种协商一

收稿日期:2021-02-25;修回日期:2021-03-24

基金项目:江苏省社会科学基金项目(18GLB016)

致的储能系统分布式控制方法,用于进行风电场功率输出实时调节。多数文献应用的分布式调度策略都需要收集系统的全局信息并传送到“调度中心”或“Leader”来计算所有单元的总功率;另外电池储能系统内阻的客观存在会影响其充放电效率,但多数文献并未考虑电池内阻。

本文将储能单元和柔性负荷建模成智能体,进一步将微电网系统建立为多智能体系统,利用多智能体完全分布式一致算法^[10]来实现考虑电池内阻抗的储能设备的有功功率分布式调度。完全分布式算法即不需要“调度中心”或“Leader”来收集电力系统中的全局信息,而是以全体储能单元和柔性负荷(智能体)共同参与局部信息交互的方式使每个单元都可得到全局信息,从而实现整个微电网系统(多智能体系统)的分布式调度。

1 图论与一致性算法

1.1 图论

假设 $G=(V,E,A)$ 为加权有向图,其中 $V=\{1,2,\dots,N\}$ 表示顶点集合,边集 $E\subseteq V\times V$, A 为邻接矩阵。集合 V 表示配电网中分散配置的储能单元。有序对 (i,j) 表示从 i 到 j 的有向边,其实际意义为储能单元 j 能收到来自储能单元 i 的信息。第 i 个储能单元的入邻居表示为 $N_i^+=\{j\in V|(j,i)\in E\}$,同样,第 i 个储能单元的出邻居表示为 $N_i^-=\{j\in V|(i,j)\in E\}$,其实际意义为每个储能单元可以从其入邻居得到信息并可以将信息发送给其出邻居。由于储能单元 i 能够收到自己的状态信息,所以定义每个顶点既属于它的入邻居也属于它的出邻居,即 $i\in N_i^+$ 并且 $i\in N_i^-$ 。定义顶点 i 的入度和出度为 $d_i^+=|N_i^+|$ 和 $d_i^-=|N_i^-|$, $|\cdot|$ 表示集合的基数。如果有向图中任意2个顶点 i,j 存在 i 到 j 以及 j 到 i 的路径,则称此有向图为强连通图。在强连通图中, $d_i^+\neq 0$ 且 $d_i^-\neq 0$ 。

1.2 一致性算法

定义与强连通图 $G=(V,E,A)$ 相关的2个矩阵 $P, Q\in R^{N\times N}$ 如式(1)和式(2)^[11]

$$p_{ij}=\begin{cases} \frac{1}{d_i^+} & j\in N_i^+, \forall i,j\in V \\ 0 & \end{cases} \quad (1)$$

$$q_{ij}=\begin{cases} \frac{1}{d_j^-} & i\in N_j^-, \forall i,j\in V \\ 0 & \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为行随机矩阵; Q 为列随机矩阵。可自由选择矩阵 P 和 Q 的权重,只要保证 P 为行随机矩阵, Q

为列随机矩阵并满足下列约束:当 $j\in N_i^+$ 时, $p_{ij}>0$, 否则, $p_{ij}=0$; 当 $i\in N_j^-$ 时, $q_{ij}>0$, 否则 $q_{ij}=0$ 。本文分布式优化算法的收敛结果与权重无关。

考虑下面2个独立的离散系统,如式(3)和式(4)所示

$$\delta_i(k+1)=\sum_{j\in N_i^+} p_{ij}\delta_j(k) \quad (3)$$

$$\delta'_i(k+1)=\sum_{j\in N_i^+} q_{ij}\delta'_j(k) \quad (4)$$

式中: $\delta_i(k)$ 和 $\delta'_i(k)$ 分别为图 G 中顶点 i 在时间 k 时的状态变量。式(3)和式(4)所示的2个系统具有相同的构造但权重却不同,可写成式(5)和式(6)

$$\delta(k+1)=P\delta(k) \quad (5)$$

$$\delta'(k+1)=Q\delta'(k) \quad (6)$$

式中: $\delta(k)$ 和 $\delta'(k)$ 分别为 $\delta_i(k)$ 和 $\delta'_i(k)$ 的列向量形式。

这些性质会在下面分散储能单元分布式实时功率调整策略的设计中用到。

2 考虑内阻抗的储能单元分布式调度策略

2.1 储能单元分布式调度问题

假设有 n 个储能单元分散配置在某配电网,每个储能单元的输出功率都有一个计划值,该计划值根据日前调度策略得到。当储能系统为配电网提供辅助服务,如可再生能源发电功率波动平抑时,储能系统实时功率输出要根据一定的原则进行调整,从而偏离计划值。由于 n 个储能单元分散配置在配电网中,组成一个分布式网络,因此考虑用分布式算法来实现功率在储能单元中的“公平分配”,同时达到平抑可再生能源发电功率波动的效果。事实上,按比例分配是分配问题的基本公平原则,并且已经广泛应用在电力系统中。

为了描述储能单元之间的功率变化分配算法,定义功率输出增量比(increment ratio of power output, IRPO)如式(7)^[3]

$$\lambda_i=u_i\frac{\Delta P_i}{P_{i0}} \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式中:下标 i 为第 i 个储能单元; u_i 为第 i 个储能单元的充、放电状态(充电为-1,放电为1); P_{i0} 为其计划输出功率, $P_{i0}>0$ 表示第 i 个储能单元正在放电; ΔP_i 为第 i 个储能单元的计划输出功率与实时输出功率之间的偏差。

为了满足“公平分配”原则,式(8)和式(9)2个等式成立

$$\lambda_1=\lambda_2=\dots=\lambda_i=\dots=\lambda_n \quad (8)$$

$$\sum_{i=1,2,\dots,n} \Delta P_i=\Delta P_\Sigma \quad (9)$$

式中: ΔP_{Σ} 为全体储能单元需要调整的总输出功率。式(8)保证了总输出功率在全体储能单元之间的公平利用或分配,使得所有储能单元的IRPO都相等;式(9)保证了全体储能单元的实际调整功率与需要调整的功率相等。为了实现“公平分配”原则,需要找到等式(7)至式(9)的最优解。

如果采用集中式调度方法,由式(7)至式(9)推导出所有储能单元的IRPO满足

$$\lambda = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{\sum_{i=1,2,\dots,n} (P_{i0} u_i)} \quad (10)$$

因此,当 $\Delta P_{\Sigma} > 0$ (或 $\Delta P_{\Sigma} < 0$), 式(7)至式(9)将会增加(或减小)储能单元的输出功率并改变其变比,实现功率调整量在全体储能单元中的公平分配。下文采用一致性算法实现的分布式调度将会与集中式调度一样,采用分布式调度得到式(7)至式(9)的解式(10)。

2.2 数学模型

微网的有功平衡可表示为

$$\sum_{k \in S_G} P_{G,k} - \sum_{j \in S_D} P_{D,j} - \sum_{i \in S_B} P_{B,i} = 0 \quad (11)$$

式中: $P_{B,i}$ 为 BESS i 的充、放电功率, $P_{B,i} > 0$ 为充电,反之放电; S_G, S_D, S_B 分别为发电机、负荷和 BESS 的集合; $P_{G,k}, P_{D,j}$ 分别为第 k 个发电机供电和第 j 个负荷的需求功率。当网损大约为总的负荷的 5%~7% 时,网损可认为极小。在孤岛微网环境下,全网中 BESS 需要向微网提供的有功功率 P_L 为

$$P_L = \sum_{k \in S_G} P_{G,k} - \sum_{j \in S_D} P_{D,j} \quad (12)$$

P_L 为正或负时,分别表示 BESS 的充电或放电模型。

为了保证微网功率的供需平衡,需要一个恰当的调度策略来调度分布式 BESS 的 P_L , 可通过控制 BESS 的 $P_{B,i}$ ($i \in S_B$) 的充、放电功率来实现

$$P_L = \sum_{k \in S_G} P_{G,k} - \sum_{j \in S_D} P_{D,j} = \sum_{i \in S_B} P_{B,i} \quad (13)$$

然而由于电池内阻的存在,当 BESS 充、放电时,会出现功率的损失如下

$$P_{B,i}^{\text{cha}} = P_{B,i} \eta_{C,i} \quad (14)$$

$$P_{B,i}^{\text{dis}} = \frac{P_{B,i}}{\eta_{D,i}} \quad (15)$$

式中: $P_{B,i}^{\text{cha}}, P_{B,i}^{\text{dis}}$ 分别为 BESS i 实际充电、放电的功率; $\eta_{C,i}, \eta_{D,i}$ 分别为充、放电效率 ($0 < \eta_{C,i} < 1, \eta_{D,i} > 1$)。

为了简单起见,下文仅考虑 BESS 在充电工况下运行的情况。BESS 输入的实际功率为

$$\sum_{i \in S_B} P_{B,i} \eta_{C,i} \quad (16)$$

为了使微网运行更具有经济性,可以通过控制 BESS 的充电参数即最大化公式(16),将网损最小化。协调运行多 BESS 的目的是最大化以下函数

$$\begin{aligned} s.t. \sum_{i \in S_B} P_{B,i} &= P_L \\ P_{B,i}^{\min} &\leq P_{B,i} \leq P_{B,i}^{\max} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $P_{B,i}^{\min}, P_{B,i}^{\max}$ 分别为充电功率的最小和最大值。

研究表明充电效率与充电速率呈线性关系^[19]

$$\eta_i = a_i - b_i P_{B,i} \quad (18)$$

式中: a_i, b_i 为 BESS i 的常数。

将公式(18)加入式(17)中,目标函数可改为

$$\max \sum_{i \in S_B} a_i P_{B,i} - b_i P_{B,i}^2 \quad (19)$$

定义公式(19)的相对于 $P_{B,i}$ 的偏导为 BESS i 的边际成本 (γ_i)

$$\gamma_i = a_i - 2b_i P_{B,i} \quad (20)$$

2.3 分布式调度策略

分散配置的储能系统之间的通信拓扑为强连通图 G 。假设存在一个虚拟命令节点向顶点集 V 的子集分配功率偏差。该“虚拟命令节点”与“Leader-Follower”一致性算法中的“Leader”不同:“Leader”是用来收集系统所有储能单元全局信息的中心(调度中心);而“虚拟命令节点”仅仅是为了在系统中分配总的功率偏差,“虚拟命令节点”本质上是虚拟节点,并不参与储能单元之间的信息交互,在实际系统运行中并不存在,是为方便设计算法而假设存在的节点。顶点 0 为虚拟命令顶点,其出邻居集合为 N_0^- 。虚拟命令顶点在其出邻居集合 N_0^- 之内平均分配需要调整的总输出功率 ΔP_{Σ} , $1 \leq |N_0^-| \leq N$ 。

初始化过程如下

$$\begin{cases} \gamma_i(0) = a_i - 2b_i P_{B,i}(0) \\ P_{B,i}(0) = 40 \\ \Delta P_i(0) = \begin{cases} \Delta P_{\Sigma} / |N_0^-| & i \in N_0^- \\ 0 & i \in V \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\gamma_i(0)$ 为初始边际成本; $P_{B,i}(0)$ 为 BESS i 的初始功率; $\Delta P_i(0)$ 为 BESS i 需要调整的功率与实际调整功率之间的偏差。

BESS 实时功率分配策略如下

$$\gamma_i(k+1) = \sum_{j \in N_i^+} p_{i,j} \gamma_j(k) + \varepsilon x_i(k) \quad (22)$$

$$P_{B,i}(k+1) = (a_i - \gamma_i(k+1)) / 2b_i \quad (23)$$

$$\Delta P_i(k+1) = \sum_{j \in N_i^+} q_{i,j} \Delta P_j(k) - (P_{B,i}(k+1) - P_{B,i}(k)) \quad (24)$$

式中: ε 为收敛系数,为足够小的正常数。

当 BESS 的输入或输出功率受 BESS 功率约束

时,引入以下变量

$$P_{Bi}(\gamma_i)=\begin{cases} P_{Bi}^{\min} & \gamma_i<\gamma_i^{\min} \\ P_{Bi}(k)=(a_i-\gamma_i(k+1))/2b_i & \gamma_i^{\min}<\gamma_i<\gamma_i^{\max} \\ P_{Bi}^{\max} & \gamma_i>\gamma_i^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中： $P_{Bi}^{\min}$ 、 $P_{Bi}^{\max}$ 分别为 BESS i 充电的最小、最大值； $\gamma_i^{\min}$ 、 $\gamma_i^{\max}$ 分别为边际成本的最小、最大值。由于通信拓扑为强连通图，所以系统中的每个储能单元都能够通过与邻居单元的信息交互得到其他储能单元的信息（ $\Delta P_i(k)$ ， $P_{Bi}(k)$ ），并将其整合为全局信息即 $\Delta P_i(k)$ ，然后根据此全局信息来调整各储能单元的功率输出 $P_{Bi}(k)$ ，以此达到平抑可再生资源发电功率波动的目的。式(22)右边部分的第一项是一致性部分，控制所有的 $\gamma_i(k)$ 达到同一个值；第二项 $\varepsilon x(k)$ 作为一个反馈机制来控制所有的 $\gamma_i(k)$ 达到最优值 γ^* ，使用特征值摄动法^[12]可得出其收敛特性。

3 算例仿真与分析

采用修改的 IEEE 33 节点配电系统来验证该算法的有效性。修改的 IEEE 33 节点配电系统如图 1 所示，图 1 中虚线代表通信线路，母线 712、母线 718 和母线 725 配置的是风力发电系统。其中，“虚拟命令节点”连接母线 704 和母线 713 即 $N_0^+=[704,713]$ 。各储能的计划输出功率如表 1 所示，总的输出功率为 1 952 kW。

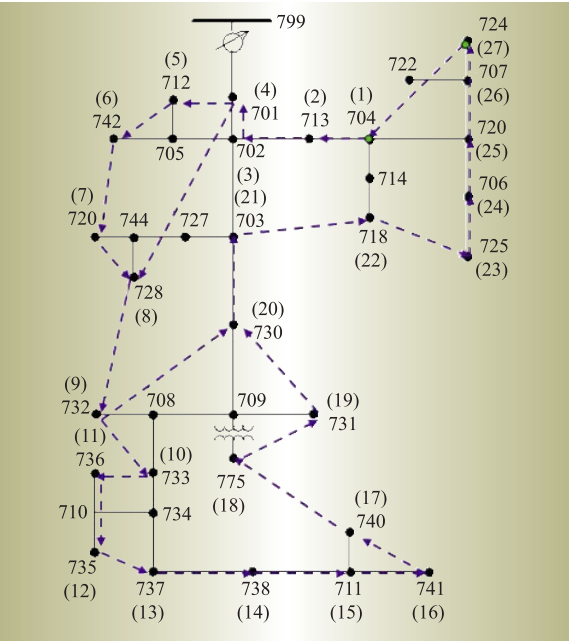


图 1 修改的 IEEE 33 节点配电系统
Fig. 1 Modified IEEE 33 bus distribution system

表 1 储能的计划输出功率

Table 1 Planned output power of energy storage

			kW		
储能	母线	P_{i0}	储能	母线	P_{i0}
1	704	927	10	733	732
2	713	47	11	736	-463
3	702	53	12	735	386
4	701	-403	13	737	620
5	712	-11	14	738	297
6	742	310	15	711	-1 004
7	729	448	16	741	-119
8	728	-157	17	740	-165
9	732	-265	18	775	95
			27	724	385

使用本文分布式策略解决该问题，并以图 1 的拓扑结构为例。假设每个储能的初始功率均为 40 kW，总的输入功率为 2 000 kW。其中，每个 BESS i 的常数系数如表 2 所示。

表 2 BESS i 的常数系数

Table 2 Constant coefficients of BESS i

储能	a_i	b_i	储能	a_i	b_i	储能	a_i	b_i
1	0.871	0.008 1	10	0.826	0.008 2	19	0.828	0.008 5
2	0.853	0.007 4	11	0.917	0.009 4	20	0.815	0.004 6
3	0.758	0.006 6	12	0.928	0.004 2	21	0.904	0.006 5
4	0.924	0.006 3	13	0.842	0.010 0	22	0.987	0.005 5
5	0.853	0.006 9	14	0.806	0.005 6	23	0.996	0.006 2
6	0.785	0.006 9	15	0.985	0.005 4	24	0.970	0.006 3
7	0.825	0.007 4	16	0.891	0.001 4	25	0.850	0.006 1
8	0.629	0.006 1	17	0.876	0.007 9	26	0.997	0.002 3
9	0.730	0.005 1	18	0.870	0.010 6	27	0.925	0.012 2

(1) 场景一：分布式功率分配策略的有效性

假设电网总的 BESS 的存储的功率为 2 000 kW，储能单元之间的通信拓扑如图 1 所示，系统仿真图如图 2 所示。

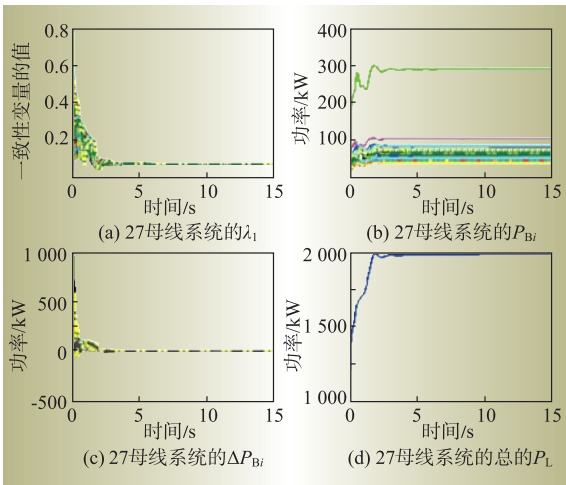


图 2 场景一系统变量仿真图
Fig. 2 System variable simulation diagram of case 1

由图 2 可知，27 个 BESS 的边际成本均收敛

为同一个值,并且27个BESS的总的存储功率等于2 000 kW。

(2) 场景二:不同通信拓扑结构下的适应性

改变通信拓扑如图3所示,仿真图如图4所示。由图4可知,27个BESS的边际成本均收敛为同一个值,并且27个BESS的总的存储功率等于2 000 kW。因此,通信拓扑不同,该算法依然可以收敛。

(3) 场景三:考虑BESS充放电功率约束

采用场景一中BESS之间的通信拓扑图。已知BESS 2的最大输出功率为50 kW,当 $\Delta P_{\Sigma}=2\ 000\text{ kW}$ 时,如果不考虑其功率约束,BESS 2的输出功率为53 kW,显然超过了其最大输出功率。仿真图如图5所示。

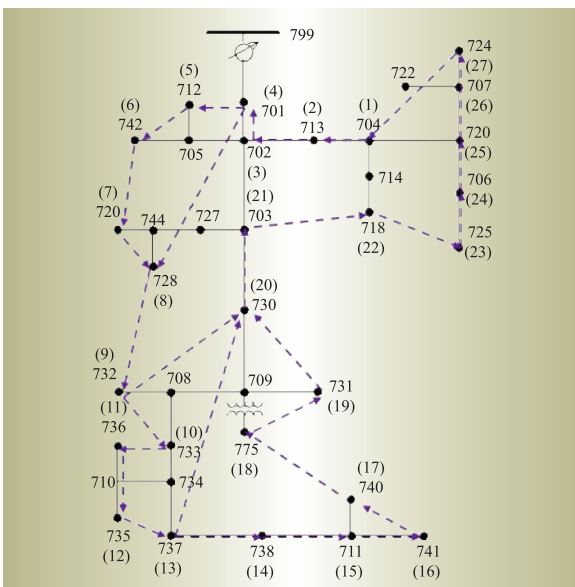


图3 改变通信拓扑的修改的IEEE 33节点配电系统图
Fig. 3 Modified communication topology of IEEE 33 bus distribution system diagram

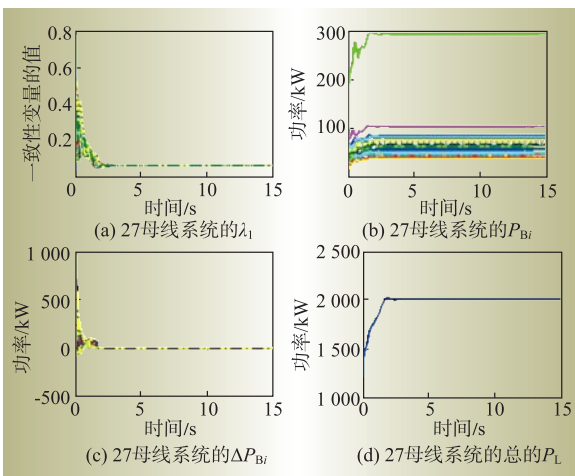


图4 场景二系统变量仿真图

Fig. 4 System variable simulation diagram of case 2

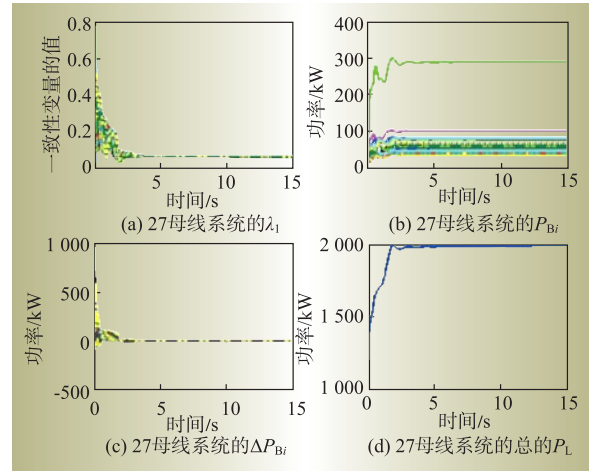


图5 场景三系统变量仿真图

Fig. 5 System variable simulation diagram of case 3

由图5可知,在考虑其功率约束后,其输出功率被稳定在50 kW且系统依然能收敛到最优一致性。

(4) 场景四:“即插即用”特性

采用场景一中BESS之间通信拓扑图, $\Delta P_{\Sigma}=2\ 000\text{ kW}$ 。在 $t=20\text{ s}$ 时,在原系统中接入某BESS(红色节点部分-母线848(28))。各BESS之间通信拓扑图如图6所示,系统变量仿真曲线如图7所示。

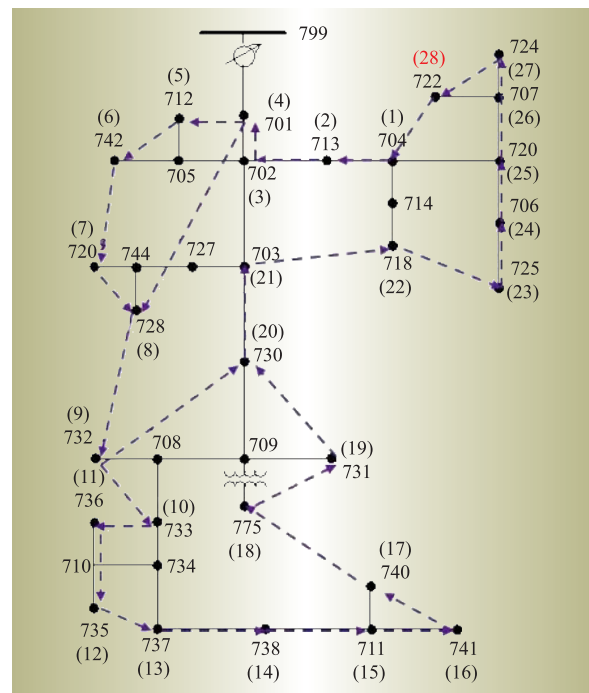


图6 接入新BESS的IEEE33节点配电系统通信拓扑图

Fig. 6 Modified communication topology of IEEE 33 bus distribution system connected to new BESS

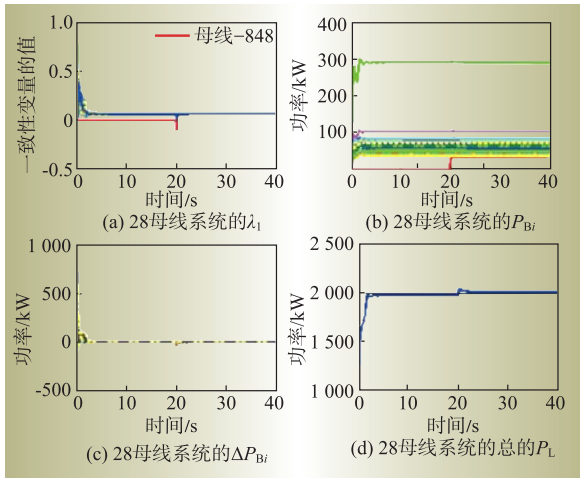


图7 场景四系统变量仿真图

Fig. 7 System variable simulation diagram of case 4

由图7可知,在接入新的BESS后,边际成本会出现短暂波动并渐近收敛到新的一致性值。显然,该算法能够满足系统对BESS“即插即用”特性的要求。

4 结束语

本文设计一种基于多智能体一致性的完全分布式算法来解决分布式储能单元的实时功率分配,并且考虑在储能电池的内阻影响下将其充放电功率最大化。该算法可以通过调整储能系统的实时功率实现平抑可再生能源发电功率波动的目标,并可避免由于“调度中心”或“Leader”出现故障而导致的功率分配策略失效的问题。在不同的通信拓扑结构中具有较好的适应性,能够满足系统“即插即用”要求。

参考文献:

- [1] DU E, ZHANG N, HODGE B M, et al. Operation of a high renewable penetrated power system with CSP plants: a look-ahead stochastic unit commitment model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 140-151.
- [2] VATANPOUR M, YAZDANKHAH A S. The impact of energy storage modeling in coordination with wind farm and thermal units on security and reliability in a stochastic unit commitment[J]. Energy, 2018(162): 476-490.
- [3] XIN H H, ZHANG M D, SEUSS J, et al. A real-time power allocation algorithm and its communication optimization for geographically dispersed energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4 732-4 740.
- [4] 刘皓明,陆丹,杨波,等.可平抑高渗透分布式光伏发电功率波动的储能电站调度策略[J].高电压技术, 2015, 41(10): 3 213-3 223.

LIU Haoming, LU Dan, YANG Bo, et al. Dispatch strategy of energy storage station to smooth power fluctuations of high penetration photovoltaic generation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3 213-3 223.

- [5] 甘伟,郭剑波,李相俊,等.面向多应用需求的分布式储能优化调度[J].电网技术, 2019, 43(5): 1 504-1 511.
- GAN Wei, GUO Jianbo, LI Xiangjun, et al. Distributed energy storage optimization scheduling for multiple application requirements[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1 504-1 511.
- [6] 屠聪为,曹军,于东立,等.基于空调负荷的虚拟储能参与调频的控制策略[J].电力需求侧管理, 2019, 21(1): 16-21.
- TU Congwei, CAO Jun, YU Dongli, et al. Control strategy of virtual energy storage system participating in frequency modulation based on air conditioning loads[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1): 16-21.
- [7] 陈刚,包宇庆,张金龙,等.计及寿命损耗成本的储能单元分布式协同控制策略[J].电网技术, 2018, 42(5): 1 495-1 501.
- CHEN Gang, BAO Yuqing, ZHANG Jinlong, et al. Distributed cooperative control strategy for energy storage units considering life loss cost[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1 495-1 501.
- [8] 吕朋蓬,赵晋泉,苏大威,等.基于一致性理论的独立微电网分布式动态经济调度[J].电力系统自动化, 2019, 43(5): 22-29.
- LYU Pengpeng, ZHAO Jinqian, SU Dawei, et al. Consensus-based distributed dynamic economic dispatching for islanded microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 22-29.
- [9] BAROS S, ILIC M D. A consensus approach to real-time distributed control of energy storage systems in wind farms[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 613-625.
- [10] HORN R A, JOHNSON C R. Matrix analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [11] YANG S P, TAN S C, XU J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. IEEE Transactions Power Systems, 2013, 28(4): 4 416-4 425.
- [12] CAI K, ISHII H. Average consensus on general digraphs[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, December 12-15, 2010, OHando, USA: 1 956-1 961.

作者简介:

张晓花(1981),女,山西五台人,博士,副教授,研究方向为电力系统优化运行与控制;

王晓亮(1993),男,安徽庐江人,硕士研究生,研究方向为电力系统经济运行。

(责任编辑 徐文红 顾婷婷)