基于多智能体的分布式能源协调控制方法

郑艺¹, 史翊翔^{1*}, 罗宇¹, 甘中学²

1. 清华大学热能工程系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 新奥集团股份有限公司, 廊坊 065000

* 联系人, E-mail: shyx@mail.tsinghua.edu.cn

2017-06-11 收稿, 2017-08-13 修回, 2017-08-14 接受, 2017-09-27 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2014CB249401)资助

摘要 立足于多智能体系统的相关理论与思想, 将其应用到以可再生分布式能源为主的能源互联网系统, 实现了分布式无中心化的控制. 并针对部件之间的通讯协议进行了设计, 制定了可以实现的简单操作协议. 在上述思想的基础上, 进一步讨论了信息拓扑对算法收敛值的影响, 得到了较为准确的结论: 完备的信息交互体系有利于系统快速稳定, 存在结构缺陷的信息交互拓扑无法达到系统最优. 此外, 本文分析了具有信息交互能力的部件所形成的系统对于外界扰动的抑制能力, 证明了相应的通讯协议能够保证系统在没有中心控制器的情况下, 依然能够对外界刺激做出迅速的反应, 为能源互联网的设计提供了另一种重要思路.

关键词 多智能体, 分布式控制, 无中心化, 可再生能源

随着能源短缺与环境危机的日益加重, 世界范围内均面临着能源转型的关键问题. 传统的化石能源储量不断下降, 而且由于化石能源具有难以消除的环境问题, 传统的能源发展模式越来越难以为继^[1]. 以风能、光能为代表的可再生的清洁能源具有资源广泛, 环境友好的特点, 成为新一代能源利用的关键点^[2,3].

从可再生能源的发展趋势来看, 小范围分布式发电的发展模式具有极好的应用前景. 这在学者之间逐渐成为共识^[4-6]. 分布式发电是相对于传统的大电厂发电、大电网供电的集中方式而言的. 在分布式发电模式中, 发电装置分布在负荷附近, 能够直接或间接向负荷供电. 这些发电装置容量和规模一般都比较小, 典型的例如小型风机和家庭式光伏发电, 还有小型燃气轮机、小型水轮机、燃料电池等适合小规模利用的设备. 同时考虑到可再生能源的波动性和间歇性, 分布式发电系统一般配备有储能设备, 以协调系统的用能.

可以预见, 未来的能源运营形式必将是大电网与分布式发电系统相结合的模式. 而且随着分布式系统的逐渐增多, 将会形成类似于互联网一样的复杂一体化的多能利用互补的能源系统, 这种发展模式被称为能源互联网. 能源互联网的定义尚无准确的定论, 但是这种由分散布置的小型能源系统整合形成大系统的思想在学术界是有共识的^[7]. 能源互联网具有自身的若干特征: 横向对比智能电网, 能源互联网是一个以电网为核心, 而又结合了信息网, 热力网等其他网络的大规模网络. 纵向对比传统的多能联产系统, 能源互联网加强了多个系统之间的交互, 使得一个个小系统有机地连接了起来^[8,9].

本文主要就能源互联网对小系统的连接进行讨论, 结合互联网中的相关理论, 提出了一个能够以多个小型能源节点之间通过互联网进行信息交互促进实际物理系统的性能提升的方法. 并且在已有理论的基础上, 对一个具有发电、储能、用电完整流程的

引用格式: 郑艺, 史翊翔, 罗宇, 等. 基于多智能体的分布式能源协调控制方法. 科学通报, 2017, 62: 3711-3718

Zheng Y, Shi Y X, Luo Y, et al. Coordination control for distributed energy based on multi-agent system (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3711-3718, doi: 10.1360/N972017-00659

风光互补系统进行了分析.

1 多智能体理论

多智能体是人工智能的一种,在20世纪80年代成为分布式人工智能的一个重要分支.目前而言,多智能体系统一般被认为是由一群具有一定的通信、计算、感知、交流以及执行能力的智能体连接而形成的网络.其核心思想是基于个体极为有限的智能,通过上层交互,产生出整体大于部分和的效果,是一种分布式协调合作系统.具有协调性、自主性和智能性的特征^[10,11].

多智能体系统具有广泛的自然背景和工程背景^[12],从自然现象上看,许多生物系统表现出多智能体的特征,例如鸟群能够发现最有利于前进的队形,蚁群能够找到最短的路径.单个的生物体无法在自然界中生存,通过群体协调,生物种群产生了远大于个体的智能.从复杂系统的角度来看,群体行为的研究对于理解广泛存在的复杂现象具有重要的意义.另外,在工程应用方面,多智能体协调控制能够广泛用于无人驾驶飞行器控制,人造卫星簇控制,甚至在网络层面的故障与病毒传播方面也有一定的指导意义.

随着能源利用向着分布式和细分化方向发展,能源结构从集中式大电厂向小型分布式联合供能转变,多智能体在能源系统领域内的应用也崭露头角.图1给出了一种可能的能源利用方法,即底层物理的分布式系统节点具有智能化的特性,能够和其他节点进行简单的沟通,通过上层信息网反馈作用到物理网,形成信息物理网耦合的多智能体系统^[13].这样的一个体系实际上是一种采用多智能体思想的信息物理系统,借助多智能体实现信息和物理系统的交互,使系统更加可靠、高效、自治.已经有大量学者

图1 (网络版彩色)信息物理网耦合的多智能体系统

Figure 1 (Color online) Multi-agent system with information and physics coupled

针对多智能体在分布式能源系统领域的应用展开了研究,其主要研究方向包括多智能体与微电网耦合,多智能体结合能量管理,分布式智能控制等^[14-19].

2 算法设计

有关多智能体系统,最主要的问题就是一致性问题.所谓多智能体的一致性,即是指根据各个智能体不同的初始状态,系统能够到达一个一致的约定状态.而“一致性算法”(协议)是指智能体与网络中的其他所有邻居的信息交互所遵循的规则.这种规则一般具有简单的表达形式,但通过这样的简单约定,系统却能够完成极为复杂的功能,这正是多智能体系统的核心思想^[20,21].

一般地,一个智能体网络对应的交互拓扑可以用图 $G=(V,E)$ 来表示,其中 $V=\{1,2,\dots,n\}$ 表示智能体节点对应的集合. $E\subseteq V\times V$ 表示智能体信息网中的相互连接. $N_i=\{j\in V:(i,j)\in E\}$ 表示与节点 i 有相互连接的节点 j 的集合.最为常见的信息一致性的协议定义如下:考虑具有动力学 $\dot{x}_i=u_i$ 的智能体网络,如果希望通过点与点的邻居之间的局部信息交互使得系统渐进收敛到一维约定空间,可以采用下式所示的简单算法:

$$\dot{x}_i(t)=\sum_{j\in N_i}a_{ij}(x_j(t)-x_i(t)). \quad (1)$$

其中, a_{ij} 是图 G 对应的邻接矩阵 A 的元素,满足 $a_{ij}\neq 0, j\in N_i; a_{ij}=0, j\notin N_i$. 利用代数图论的语言,可以将式(1)写作:

$$\dot{x}_i(t)=-Lx. \quad (2)$$

L 是图 G 对应的拉普拉斯矩阵,其表达式为 $L=D-A$, D 是图 G 的度矩阵, A 是图 G 的邻接矩阵,换言之, L 中的对角线上的元素即每一个点对应的度,其余元素是邻接矩阵中元素的相反数,表征节点 i 和 j 相连与否.上述算法收敛的充分条件是图 G 是一个连通的无向图,而且系统会收敛到所有点的初始值的平均值上去.关于系统的收敛速度,也有学者进行了研究,研究表明系统收敛速度和图 G 对应的拉普拉斯矩阵的第二小的特征值的大小有关系,这一特征值被称为代数连通性.

实际上,多智能体系统很难在连续时间下进行交互,多为离散时间下的变化.此时对应的一致性算法为:

$$x_i(k+1)=x_i(k)+\varepsilon\sum_{j\in N_i}a_{ij}(x_j(k)-x_i(k)). \quad (3)$$

写成矩阵的形式, 即:

$$x_i(k+1)=Px(k). \quad (4)$$

上述算法同样在图 G 强连通的情况下渐进收敛, 收敛值与图 G 的性质有关, 当 G 是一个平衡图的时候, 系统会收敛到初始值的均值上去.

一致性算法给出了很好的性质, 在群集问题、蜂拥问题、聚集问题、传感器网络估计问题等方面有很大的应用. 但是, 对于能源系统的运行而言, 实际上并无明显的一致性的特点, 能源系统更强调系统最优配置, 本文针对这一问题, 借鉴上述一致性算法, 提出了使能源系统达到效率最优的交互协议.

对于若干个能源节点形成的图 G , 设每一个节点的负载为 p_i 以及相应负载下的效率值为 $\eta_i(p_i)$, 定义目标函数为:

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{\sum_i p_i}{\sum_i \eta_i} = \frac{\sum_i p_i}{\sum_i c_i}. \quad (5)$$

一般的优化问题通过集中调度, 赋予每个节点应该输出的功率, 保证整体负载不变. 此处, 我们采用点与点之间的交互协议, 能够使系统自发地达到最优配置. 协议的内容如下:

$$p_i^{k+1} = p_i^k + \Delta p \sum_{j \in N_i} \text{sgn} \left(\frac{dc_j(p_j^k)}{dp_j^k} - \frac{dc_i(p_i^k)}{dp_i^k} \right). \quad (6)$$

这里用上标 k 表示离散的时间点. 式(6)给出了每一个节点通过邻居沟通后获得信息对自身输出调节的影响, 其中 c_i 是节点 i 的总耗能, sgn 是符号函数, Δp 为充分小的出力变化. 下面从理论上证明, 式(6)表示的这种分布式调节方法能够使得目标函数达到最优.

本文采用数学归纳法进行证明. (1) 当节点总数为2时, 不失一般性, 不妨设

$$\frac{dc_2(p_2^k)}{dp_2^k} > \frac{dc_1(p_1^k)}{dp_1^k}. \quad (7)$$

此时有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\eta_{\text{tot}}^{k+1}} - \frac{1}{\eta_{\text{tot}}^k} &= \frac{c_1(p_1^{k+1}) + c_2(p_2^{k+1})}{p_1^{k+1} + p_2^{k+1}} - \frac{c_1(p_1^k) + c_2(p_2^k)}{p_1^k + p_2^k} \\ &= \frac{c_1(p_1^{k+1}) + c_2(p_2^{k+1}) - c_1(p_1^k) - c_2(p_2^k)}{p_1^{k+1} + p_2^{k+1}} \\ &= \frac{(\dot{c}_1 - \dot{c}_2)\Delta p - o(\Delta p^2)}{p_1^{k+1} + p_2^{k+1}}. \end{aligned} \quad (8)$$

当 Δp 足够小时, 有 $\eta_{\text{tot}}^{k+1} > \eta_{\text{tot}}^k$, 在每一次交互中, 效率都是单调提升的, 故系统必能达到最优. (2) 假设当节点数小于等于 N 时, 结论都成立, 那么当新增加一个节点时, 由于新节点与每一个邻居节点交互的作用都是使得二者对应的子系统效率增加, 则总效率也会增加, 算法的最优性可以保障. 但必须注意到要选择合适的 Δp .

3 理想模型分析

尽管已经从理论上得出了算法的最优特性, 但是值得注意的一点是算法具有无法预料的过程, 而且算法的收敛速度和系统的拓扑结构有很大的关系. 下面从数值模拟的角度对算法进行验证和进一步的分析.

这里采用8个理想的能源节点作为研究对象, 假设在物理上是两两联通的, 并且节点间的能量传输损耗忽略不计. 图2给出了被研究的8个节点各自的效率负载曲线, 可以看到他们具有截然不同的承担负载的能力, 简便起见, 本文假设这8个节点具有相同的最优效率. 注意到, 这里的节点特性是基于典型能源节点假设得到的, 尽管并非实际数据, 但能够概要地表现出能源节点的特点, 对于初步的数值验证已经足够.

为了讨论理想物理条件下信息网对系统的影响, 本文采用了5种可能的拓扑结构进行分析, 如图3所示. 其中ABCD均为连通图, A是一个典型的环形结构, D是一个全连通图, 最大程度地连接了整个网络, B和C则处于A与D的过渡. 作为对照, 本文选择图4所示的E这种非联通的结构进行了对比分析.

图2 (网络版彩色)各节点的效率特性

Figure 2 (Color online) The efficiency performance of each node

图3 (网络版彩色)4种典型的联通的拓扑结构
 Figure 3 (Color online) Four typical connected topologies

图4 (网络版彩色)非联通的拓扑结构
 Figure 4 (Color online) Unconnected topology

计算结果如图5所示,模型涉及到的工况如下:初始时各节点在各自负载下工作,在300 s时被允许进行信息交互,可以自由地传输能量.自发地运行一段时间后,到2600 s的时候,人为的设定一种特殊情况,即节点7的负荷急剧增加50%,效率大幅度下降,此时观察整个系统自组织式的响应过程.从图中可以看出,有信息作用在系统之后,即便是在每一个节点都具有极为有限的智能情况下,也可以看到系统整体上表现出了一定的涌现性质,即系统能效有所提升.当节点7的负荷大幅度增加之后,系统能效下降,节点7性能恶化,但是在没有人为调度的情况下,系统经过一段时间自发的维护,重新使得效率回升到一定水平.从图6所示的D拓扑结构对应的功率变

图5 (网络版彩色)信息交互引起的效率提升
 Figure 5 (Color online) Efficiency promotion caused by information exchange

化曲线来看,发生这种效率回升的现象的原因就是节点7得到了其他节点自发的支援,其他节点根据自身能力的不同,一定程度上分担节点7过高的负荷,使节点7维持在相对理想的状况,这也提高了系统能效.

同时,从图5的结果来看,尽管在A~D四种拓扑结构下,系统均达到了稳定点,但是很明显地可以看出系统的收敛速度有很大的差距,对于D所示的完全连通的结构,系统能够很快地达到稳定,而对于A这种最简单的环形结构,系统达到稳定的时间则远大于D对应的情况.图7和6所示的功率变化曲线可以清晰地表明A和D的差距.

另外,对于结构E而言,可以看到他的稳定时间非常长,而且最为本质的一点是, E对应的稳定态的效率是低于其他的连通图的,因为E是一个非联通体

图6 (网络版彩色)各节点的功率变化情况(D)
 Figure 6 (Color online) Power variation of each node (D)

图7 (网络版彩色)各节点的功率变化情况(A)

Figure 7 (Color online) Power variation of each node (A)

系, 和其他拓扑有本质的差别.

4 实际模型分析

考虑若干个具有可再生能源发电, 储能, 用能的完整子系统之间的基本能量调度问题. 图8给出了每一个节点的结构, 其中包含了内燃机, 风力发电和光伏发电以及锂电池.

风力发电输出功率主要受风速 v , 桨距角 β 和叶尖速比 λ 三个因素影响. 风机捕获的风能可以由下式计算得到:

$$P_r = \frac{1}{2} C_p(\beta, r) \rho \pi r^2 v^3. \quad (9)$$

其中 P_r 为风力机吸收功率, ρ 为空气密度, $C_p(\beta, r)$ 为风能利用系数, r 是风轮半径. 而风电机组能够输出的功率这里近似用与风速的分段函数来表示, 其近似关系如下^[22]:

图8 (网络版彩色)节点内部结构

Figure 8 (Color online) Internal structure of each node

$$\begin{cases} P = 0, & v < v_{in} \text{ or } v > v_{out}, \\ P = P_r \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}}, & v_{in} \leq v \leq v_r, \\ P = P_r, & v_r \leq v \leq v_{out}. \end{cases} \quad (10)$$

v_{out} , v_r , v_{in} 分别是风机的切出风速, 额定风速和切入风速. 本文研究的风机参考金风S77-1500型风力发电机, 采用相关参数作为仿真的数据^[23].

光伏模型采用应用于工程的基本数学模型, 考虑了几个关键参数对光伏组件的影响, 包括短路电流 I_{sc} , 开路电压 U_{oc} , 最大功率点电流 I_m , 最大功率点电压 U_m 和最大功率点功率 P_m . 其电压电流特性用下式描述^[24]:

$$I = I_{sc} N_p \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{U}{N_s C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\}. \quad (11)$$

其中 C_1, C_2 为上述5个关键参数的函数. 同时, 考虑到温度和光照强度的变化, 本文对上式进行了修正, 不再赘述.

锂电池模型采用二阶RC等效电路模型, 如图9所示.

下式描述了其主要的电压电流特性:

$$V_{tot} = V_{ocv} - IR_{ohm} - V_k - V_d. \quad (12)$$

其中 V_{tot}, V_k, V_d 分别是总电压, 电化学极化损失电压和浓差极化损失电压^[25,26].

同样地, 使若干个分布式能源站在某个时间点通过信息拓扑连接起来, 观察整体的能效变化. 简单起见, 这里采用环形连接的方式. 计算结果如图10所示, 由于风速的变化, 整体上的效率呈现出较为快速的波动. 在2000 s时, 允许节点通过信息网进行交互, 交互规则依然遵循式(6)所示的算法. 可以看到, 在节点能够进行信息交互以后, 整个系统的平均效率有了一个提升, 整体的波动曲线位于不进行信息交

图9 锂电池二阶RC等效电路

Figure 9 Second order RC equivalent circuit of Li battery

图10 (网络版彩色)信息交互对系统效率波动的影响
Figure 10 (Color online) System efficiency fluctuation due to information exchange

互的情形下的曲线的上方,这说明算法对于比较实际的系统依然适用,即算法对节点具体的效率、功率

曲线没有光滑性要求。

5 结论

本文参照多智能体的一致性算法,结合代数图论相关理论设计了一种简单有效的分布式协调管理方法,并且在理论和仿真上进行了验证,结果表明算法具有良好的结果和鲁棒性。同时,仿真结果给出了信息拓扑对整个算法的影响,将信息对物理系统的作用表现了出来。

但值得注意的是,上述算法是在忽略了物理连接对应的损耗的情况下得出的,与实际情况有一定的出入,需要进一步的完善。一个基本的思想就是在算法中增加一项表征节点 i 和 j 传输能量损耗的因子,只有当效率的提升足以抵消能量的损耗时,才会进行能量传输,这有待后续的验证。

参考文献

- Han F. Development status and prospect of renewable energy in China (in Chinese). *Renew Energ Resour*, 2010, 28: 137–140 [韩芳. 我国可再生能源发展现状和前景展望. *可再生能源*, 2010, 28: 137–140]
- Zhao L, Bai J H, Xin S X, et al. Study on development path of renewable energy in China (in Chinese). *Electr Pow*, 2016, 49: 178–184 [赵良, 白建华, 辛颂旭, 等. 中国可再生能源发展路径研究. *中国电力*, 2016, 49: 178–184]
- Zhao Y Q, Shi J L, Gao H. Renewable energy development, outlook and policy measures in China (in Chinese). *Renew Energ*, 2011, 33: 5–9 [赵勇强, 时璟丽, 高虎. 中国可再生能源发展状况、展望及政策措施建议. *中国能源*, 2011, 33: 5–9]
- Rahman H A, Majid M S, Jordehi A R, et al. Operation and control strategies of integrated distributed energy resources: A review. *Renew Sust Energ Rev*, 2015, 51: 1412–1420
- Zeng M, Ouyang S J, Shi H, et al. Overall review of distributed energy development in China: Status quo, barriers and solutions. *Renew Sust Energ Rev*, 2015, 50: 1226–1238
- Huang J Y, Jiang C W, Xu R. A review on distributed energy resources and microgrid. *Renew Sust Energ Rev*, 2008, 12: 2472–2483
- Dong C Y, Zhao J H, Wen F Q, et al. From smart grid to energy internet: Basic concept and research framework (in Chinese). *Auto Electr Pow Syst*, 2014, 38: 1–11 [董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架. *电力系统自动化*, 2014, 38: 1–11]
- Yu S H, Sun Y, Niu X N, et al. Energy internet system based on distributed renewable energy generation (in Chinese). *Electr Pow Auto Equip*, 2010, 30: 104–108 [于慎航, 孙莹, 牛晓娜, 等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统. *电力自动化设备*, 2010, 30: 104–108]
- Zha Y B, Zhang T, Huang Z, et al. Analysis of energy internet key technologies (in Chinese). *Sci Sin-Inform Sci*, 2014, 44: 702–713 [查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 702–713]
- Xie G Q, Zhang Y. Survey of consensus problem in cooperative control of multi-agent systems (in Chinese). *Appl Res Comput*, 2011, 28: 2035–2039 [谢光强, 章云. 多智能体系统协调控制一致性问题研究综述. *计算机应用研究*, 2011, 28: 2035–2039]
- Hong Y G, Di C. Dynamic coordination and distributed control design of multi-agent systems (in Chinese). *Contr Theor Appl*, 2011, 28: 1506–1512 [洪奕光, 翟超. 多智能体系统动态协调与分布式控制设计. *控制理论与应用*, 2011, 28: 1506–1512]
- Wang X L, Hong Y G. New progress in the study of distributed control of multi-agent system (in Chinese). *Complex Syst Complexity Sci*, 2010, 7: 70–81 [王晓丽, 洪奕光. 多智能体系统分布式控制的研究新进展. *复杂系统与复杂性科学*, 2010, 7: 70–81]
- Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet. *Proc IEEE*, 2011, 99: 133–148

- 14 Sun Q Y, Han R K, Zhang H G, et al. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet. *IEEE Trans Smart Grid*, 2015, 6: 3006–3019
- 15 Kremers E, Gonzalez de Durana J, Barambones O. Multi-agent modeling for the simulation of a simple smart microgrid. *Energy Convers Manag*, 2013, 75: 643–650
- 16 Yoo C H, Chung I Y, Lee H J, et al. Intelligent control of battery energy storage for multi-agent based microgrid energy management. *Energies*, 2013, 6: 4956–4979
- 17 Zhao P, Suryanarayanan S, Simoes M G. An energy management system for building structures using a multi-agent decision-making control methodology. *IEEE Trans Ind Appl*, 2013, 49: 322–330
- 18 Lagorse J, Paire D, Miraoui A. A multi-agent system for energy management of distributed power sources. *Renew Energ*, 2010, 35: 174–182
- 19 Dimeas A L, Hatziaargyriou N D. Operation of a multiagent system for microgrid control. *IEEE Trans Power Syst*, 2005, 20: 1447–1455
- 20 Li Z K, Duan Z S, Chen G R, et al. Consensus of multiagent systems and synchronization of complex networks: A unified viewpoint. *IEEE Trans Circuit Syst-I*, 2010, 57: 213–224
- 21 Ren W, Beard R W, Atkins E M. A survey of consensus problems in multi-agent coordination. *Proceedings of the 2005 American control conference*. New York: IEEE, 2005. 1859–1864
- 22 Liu Q H, He Y K, Zhang J H. Operation control and modeling-simulation of AC-excited variable-speed constant-frequency (AEVSCF) wind power generator (in Chinese). *Proc CSEE*, 2006, 26: 43–50 [刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真. *中国电机工程学报*, 2006, 26: 43–50]
- 23 Liu G. Researches on wind speed and wind power forecasting system for wind farm (in Chinese). Master Dissertation. Nanchang: East China Jiaotong University, 2011 [刘刚. 风电场风速及功率预测系统研究. 硕士学位论文. 南昌: 华东交通大学, 2011]
- 24 Fan S C. Investigation on equivalent modeling of photovoltaic power plants (in Chinese). Master Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 [樊世超. 光伏电站的等效建模研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016]
- 25 Zhang H L. Research for state of charge estimation algorithms of lithium-ion battery based on equivalent circuit model (in Chinese). Master Dissertation. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016 [张惠玲. 基于等效电路模型的锂离子电池组SOC估算研究. 硕士学位论文. 绵阳: 西南科技大学, 2016]
- 26 Zhang W P, Lei G Y, Zhang X Q. Study on Li-ion battery equivalent circuit models (in Chinese). *Chin J Power Sour*, 2016, 40: 1135–1138 [张卫平, 雷歌阳, 张晓强. 锂离子电池等效电路模型的研究. *电源技术*, 2016, 40: 1135–1138]

Summary for “基于多智能体的分布式能源协调控制方法”

Coordination control for distributed energy based on multi-agent system

ZHENG Yi¹, SHI YiXiang^{1*}, LUO Yu¹ & GAN ZhongXue²

¹ Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² ENN Energy Holding Limited, Langfang 065000, China

* Corresponding author, E-mail: shyx@mail.tsinghua.edu.cn

In the future, energy utilization structure will be centralized plant combining with decentralized and distributed energy resources. With the development of clean and renewable energy, much more difficult control problem occurs simultaneously. Centralized control is suitable for existing system while not sufficient to future. We propose a multi-agent system to control distributed energy resources, which is a typical idea that information can exert influence on physical system.

The most important design of the control system is communicating protocol between two energy points. Traditionally in multi-agent system, the communicating protocol is used to get to emergence of consensus, which means all the state of agent become the same. However, in energy system, what we considered is not the consensus but optimal allocation. We rewrite the multi-agent protocol to make it suitable for our demand: to get optimum not consensus and we make it under some specific assumption.

In this paper firstly, we demonstrate the convergence and optimum of the algorithm whereby detailed mathematic calculation. Secondly, an ideal 8 distributed energy systems model is used to study the process generated by the protocol. Besides, different topology of distributed energy points is considered carefully and the detailed reason why the efficiency can be improved is discussed. Finally, we apply this method to a realistic system to make further study.

Both the mathematic demonstration and simulation results show that the distributed algorithm can be successfully used to improve efficiency of the system. In mathematic demonstration, we use induction to prove that final result must be better than the origin only by every two points' communication. Without centralized control, the system will evolve into a better allocation. Then in simulation, we study the process detailly. A typical overload working condition is studied. There are 8 points in the system and each point has its own load and load curve. When we set a point's load increasing by 50%, we get the synergy of the whole system. Traditionally, centralized control will dispatch the load to other points to make sure that the overload one is not so bad. Here, without any external command, the system regulates itself automatically. The overload is shared by other points around the broken one and how much other points share depends on its ability.

Furthermore, we study the influence of the topology of system. The conclusion is that with more complete information topology, which means there are connection between every two points as much as possible, the convergence speed will be faster but the final convergence point is the same. However, if the topology is unconnected, the final result is totally different with connected one.

Finally, the algorithm is applied to a distributed energy system with generation, energy storage and users. The result shows even the load curve of each point is much more difficult than ideal one, the algorithm still works and the average efficiency is improved.

In this paper, the most creative idea is switching multi-agent consensus algorithm to distributed control method. Although some characteristics are neglected, the result can assure the essential validity of the algorithm.

multi-agent system, distributed control, decentralized, renewable energy

doi: 10.1360/N972017-00659