

基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法综述

乐 健,周 谦,赵联港,王 阳
(武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要:传统集中式调度方法难以满足高渗透率分布式电能资源接入背景下电力系统经济调度的需求,分布式经济调度方案因具有可靠性高、可扩展性强、通信计算负载均匀等特点得到了越来越多的关注。对电力系统分布式经济调度方法的国内外研究现状进行了综述,重点阐述了一致性算法的原理、应用及成为分布式经济调度主导算法的原因。比较了集中式和分布式经济调度系统及问题的求解过程,分析了分布式经济调度实现过程的关键环节,并对现有关键问题解决方法优缺点进行了评述,分析了电力系统分布式经济调度方法研究中有待解决的问题并提出了未来可进一步研究的方向。

关键词:电力系统;经济调度;一致性算法;投影梯度算法;交替方向乘子法;等微增成本

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202002019

0 引言

经济调度是电力系统中最基本的问题之一,涉及在满足电力系统各种约束的前提下,如何确定多台发电机组的出力以满足总负荷需求^[1],同时最小化总发电成本的问题。传统经济调度通常由调度中心收集所有必需信息,建立优化模型并进行求解,得到最优调度方案后向各发电单元发出调度指令。随着数量众多、地理分散且特性各异的分布式发电、分布式储能、用户需求响应资源等新型可控单元接入比例的不断增大,传统配电网集中调度模式存在调度中心通信和计算压力巨大、调度中心单点故障容易导致系统失效而可靠性不高的问题。更为重要的是,这种模式无法提供与分布式电能资源所有权、决策权和控制权高度分散相适应的控制鲁棒性和接入灵活性^[2]。

为弥补集中式经济调度存在的不足,电力系统分布式经济调度方法得到了越来越多的关注和研究。分布式经济调度模式强调参与调度各单元的自主决策和个体智能,各单元根据信息交换协议经由局部通信网络与其邻居交换必要的信息,进行信息综合后做出独立决策以调整自身出力,通过多个单元的协同配合实现经济调度目标。相较而言,采用分布式模式的系统具有更强的鲁棒性、良好的可扩展性、均匀的计算和通信负担、更强的信息保密性和安全性等明显的特点和优势^[3],相关研究成果已被成功应用于多智能体系统如无人机编队和机器人协同^[4],复杂网络系统如城市交通、数字通信以及生态系统^[5]等的调度和控制中。

与其他分布式控制领域的应用类似,分布式经济调度模式的实现主要包括局部通信网络的规划设计、局部信息交换协议设计和分布式优化模型的建

立等。本文重点对电力系统分布式经济调度的优化模型建立和分布式求解算法的国内外研究现状进行了综述。通过对集中式和分布式经济调度过程的比较,分析了实现过程各环节所涉及的关键问题,并对现有分布式经济调度问题解决方法优缺点进行了评述。指出了基于一致性算法的电力系统分布式经济调度研究中有待解决的问题及进一步可能的研究方向。希望本文的工作对电力系统分布式经济调度方法设计与应用的研究者有一定的帮助和启迪,进而促进该领域进一步的研究和工程实用化发展。

1 集中与分布式经济调度模式的比较

1.1 系统结构及其性能要求对比

图1给出了集中和分布式模式下实现经济调度系统的一般结构^[6-7]。

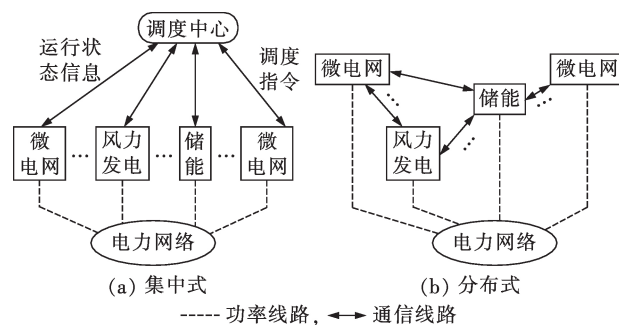


图1 经济调度系统结构对比

Fig.1 Comparison of economic dispatch system structures

由图1可知,从系统结构而言,2种调度模式主要的区别在于有无调度中心和对通信网络的要求不同。集中式调度需要设置调度中心并由调度中心完成全部计算工作,各单元上传所有必要的信息并执行相应调度指令;分布式调度中各单元地位平等而无需调度中心,由各单元交换一定的信息,完成个体计算任务并自主执行调度指令。集中式调度系统的

通信网络具有以调度中心为中心点的星状拓扑,且各通信链路为双向;分布式系统仅要求通信网络拓扑连通^[8],甚至是联合连通即可^[9],通信链路可为双向或单向^[10]。

需要指出的是,集中和分布式经济调度模式的差别不仅在于通信网络拓扑不同和有无调度中心,通常电力网络所处空间和规模也是应用不同模式的重要考虑因素:集中式适用于具有大容量、可集中调控特征的电力资源,而分布式更适用于小容量、不利于集中调控的电力资源的管理和调控。因此,作为集中式与分布式经济调度模式的综合,目前还出现了将两者进行有效结合的分层分散式调度模式。该模式需要调度中心协调所有局部子系统控制器的响应和操作,计算和通信压力由各子系统分担。分散式结构可看作集中式向分布式的过渡。表1比较了集中式与分布式经济调度模式对系统的性能要求。

表1 系统性能要求对比

Table 1 Comparison of system performance requirements			
对象	指标	性能	
		集中式	分布式
调度中心	计算能力	非常高	
	通信能力	非常高	
	可靠性	非常高	
通信系统	拓扑结构	星状	联合连通
	通信方式	双向	单/双向
	信息内容	包含隐私信息	可仅交换非隐私信息
参与个体	通信能力	普通	普通
	计算能力	无要求	较高
	信息采集能力	普通	普通

由表1可知,集中式经济调度系统主要存在如下问题:①计算通信压力分布极不均匀而对调度中心性能要求高;②系统单点故障尤其是调度中心故障容易导致整个控制系统失效;③经济投资大,主要体现在需为每一个参与对象建设与调度中心的通信线路和高带宽通信基础设施,调度中心运维成本高昂;④集中式调度效率在电网的物理结构改变、分布式电源接入/退出和通信网络拓扑改变时被削弱。相应地,分布式结构更适用于处理拓扑变换和“即插即用”特性。此外,它也具有更好的鲁棒性与可拓展性,在大规模电网中的优势更为明显。

需要注意的是,目前分布式经济调度还基本处于理论研究阶段,在应用上还有不少技术约束。其关键技术约束总结如下:①在分析过程中对经济调度的一些关键环节进行了简化处理,在现有理论成果下,分布式模型在处理非凸非光滑成本函数、系统网损等情况下尚不如集中式方法;②仅能考虑局部性约束条件,例如各分布式电源的输出功率约束,而对全局性约束如节点电压和支路潮流等尚无有效解决技术手段;③分布式环境下信息安全问题更为突

出,不仅存在通信网络易受攻击的问题,同时某些个体提供对自身有利的虚假信息以博取更大利益的现象也必然存在。分布式经济调度关键约束技术的具体评述将在后文展开。虽然分布式经济调度要在工程实践中得到真正应用还需解决很多关键技术问题,但无论如何,分布式模式因其独特的优势必将在未来智能电网经济调度中发挥重要作用。

1.2 经济调度问题求解过程对比

电力系统经济调度是一个典型的优化问题,其求解必然涉及经济调度模型的建立和模型求解方法设计2个环节。图2给出了集中和分布式经济调度问题求解过程中各环节的对应关系。

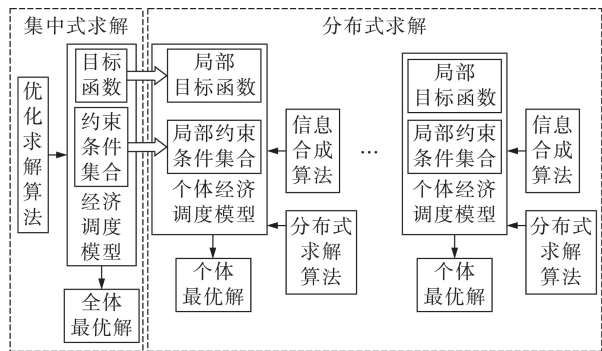


图2 经济调度问题求解过程对比

Fig.2 Comparison of solution processes of economic dispatch problems

分布式经济调度通过将经济调度模型分解为各参与对象的个体经济调度模型,基于信息合成算法所提供的信息,各个体间相互通信,采用分布式优化算法进行模型求解后得到个体最优解,所有个体最优解的集合即为经济调度问题的最优解。该求解过程充分体现了分布式主体的自治性和互动性,以最常用的分布式一致性经济调度为例,分布式主体根据制定的一致性协议迭代计算各自的一致性变量,并据此计算结果结合自身参数做出独立决策,独立控制其输出有功功率,实现自治;各分布式主体的互动性则体现在需与相邻的主体进行实时数据交换(一致性变量),通过协同配合就微增成本值达成一致,实现经济调度目标。

与集中式经济调度问题求解过程进行对比分析可知,目标函数的分解及约束条件的分布式处理、信息综合算法以及分布式优化求解方法是分布式经济调度问题求解的关键环节,下文将重点对这些关键环节的现有处理方法进行详细评述。

2 求解关键环节及现有方法评述

2.1 目标函数及其分解方法

经济调度问题目标是在满足系统约束的前提下使得总发电成本最小,因此最常见的目标函数为:

$$\min F = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi}) \quad (1)$$

其中, P_{Gi} 和 $F_i(P_{Gi})$ 分别为第 i 个发电单元的输出功率和成本-功率函数; n 为发电单元总数。现有分布式经济调度多考虑二次凸函数形式的成本函数^[11], 即:

$$F_i(P_{Gi}) = c_i + b_i P_{Gi} + a_i P_{Gi}^2 \quad (2)$$

其中, a_i, b_i, c_i 为第 i 个发电单元的发电成本系数。

文献[12]提出以社会福利最大为调度目标, 即不仅考虑发电单元成本, 还计及系统中柔性负荷的用电效益, 其目标函数为:

$$\min G = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi}) - \sum_{j=1}^m B_j(P_{Dj}) \quad (3)$$

其中, $B_j(P_{Dj}) = \gamma_j + \beta_j P_{Dj} + \alpha_j P_{Dj}^2$, 为第 j 个柔性负荷的效益函数, P_{Dj} 为其用电功率, $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ 为效益函数相关系数; m 为柔性负荷总数。

文献[7]以发电成本和污染气体排放最小为经济调度目标, 采用线性加权进行2个目标的综合:

$$\min P = \omega \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi}) + (1 - \omega) \sum_{i=1}^n H_i(P_{Gi}) \quad (4)$$

其中, $H_i(P_{Gi}) = \sigma_i + s_i P_{Gi} + \tau_i P_{Gi}^2$, 为发电机污染气体排放量相应的经济惩罚, σ_i, s_i, τ_i 为惩罚函数相关系数; ω 为权重。

上述总目标函数所考虑的成本函数、柔性负荷效益函数(其二次项系数为负)和污染气体排放经济惩罚函数均为二次函数形式, 因而总目标函数为光滑凸函数, 从而有利于设计优化求解算法。

文献[13]研究了考虑阀点效应^[14-15]的分布式经济调度问题, 此时某个发电单元的成本函数为:

$$\begin{cases} F_i(P_{Gi}) = c_i + b_i P_{Gi} + a_i P_{Gi}^2 + E_i \\ E_i = \left| g_i \sin \left[h_i (P_{Gi} - P_{Gi}^{\min}) \right] \right| \end{cases} \quad (5)$$

其中, E_i 为阀点效应引起的成本特性变化; g_i, h_i 为效应系数; $P_{Gi}^{\min}$ 为第 i 个发电单元的输出功率下限。此时目标函数为非凸函数, 需特别设计优化求解算法。

此外, 风光等新能源发电燃料成本基本可忽略不计, 一般只计及维修成本和折损成本。文献[16]将光伏与蓄电池组合为可调度清洁能源, 建立了二次型成本函数模型。采用新能源发电优先调度时, 通常这些单元为全功率输出而不考虑其发电成本。文献[17]考虑了风电的线性成本、高估成本和低估成本, 将风力发电成本写成含不完全 Γ 函数的形式, 并用投影梯度算法进行求解。文献[18]将储能单元寿命损耗成本函数写成关于输电量的幂函数形式, 对储能单元经济电量分配进行了分布式求解。但总体而言, 目前经济调度多考虑凸函数形式的目标函数。

分布式经济调度需将总目标函数分解为多个局部目标函数, 且要求: ①易于分解; ②局部目标函数

易于个体本地计算; ③分解为局部目标函数的凸组合。

可以看到目标函数式(1)、(3)和(4)即是各发电单元相应成本函数的线性凸组合, 各函数也能很方便地进行本地计算。因此就目标函数而言, 分布式经济调度问题非常适合于采用分布式方法进行求解。

2.2 约束条件及其处理方法

电力系统经济调度中最重要的2个约束条件为总功率平衡约束(等式约束)和发电功率约束(不等式约束), 即:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D + P_L \quad (6)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (7)$$

其中, P_D 和 P_L 分别为系统总负荷功率和网损; $P_{Gi}^{\max}$ 为第 i 个发电单元的输出功率上限。

其他考虑的约束条件还包括发电单元功率爬坡速率约束和线路潮流约束等^[19-20], 即:

$$\Delta P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi}(t) - P_{Gi}(t-1) \leq \Delta P_{Gi}^{\max} \quad (8)$$

其中, $\Delta P_{Gi}^{\min}$ 和 $\Delta P_{Gi}^{\max}$ 分别为第 i 个发电单元输出功率变化量的最小值和最大值。

$$|P_{Lf,d}| \leq P_{Lf,d}^{\max} \quad (9)$$

其中, $P_{Lf,d}$ 、 $P_{Lf,d}^{\max}$ 分别为线路 d 的实际潮流和最大允许潮流。

与总目标函数的分解要求类似, 上述各约束条件需要进行分布式处理。不等式约束式(7)和式(8)的计算和判断仅与各发电单元相关, 因而是目前考虑最多的不等式约束条件。但式(9)需要获知所有线路的实际潮流, 很明显由各个发电单元进行局部测量或计算得到相应信息是不切实际且难以实现的, 因此这种不等式约束难以在分布式经济调度中得到考虑, 类似的还有节点电压约束等。因此集中式经济调度易于处理这些不等式约束, 而目前分布式经济调度方法难以解决。

关键的等式约束式(6)的处理同样存在类似的问题, 式(6)含有2个全局性变量, 即总负荷功率 P_D 和网损 P_L 。网损实质是全体发电单元输出功率的一个非线性函数, 在集中式经济调度中可通过潮流计算方便得到, 但在分布式调度中显然无法由各单元计算得到, 文献[21]通过B系数法计算各节点分摊网损, 但计算精确度不高。因此现有分布式经济调度基本没有考虑网损的影响, 导致问题求解精度低于集中式经济调度方案。

忽略式(6)中的网损 P_L , 目前主要通过如下方法进行该等式约束的分布式处理:

(1)将式(6)作为一个整体等式约束在某个发电单元的局部调度模型中进行考虑, 即构成目前较为

常用的领导者-跟随者(Leader-Follower)分布式经济调度模式,在此模式下由领导者负责系统功率差额 $\Delta P = P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi}$ 的计算,而其他跟随者无需考虑该等式约束;

(2)将式(6)分解为多个等式约束在各发电单元的局部调度模型中分别进行考虑,即构成完全分布式经济调度模式。

2.3 信息综合及分布式求解算法

在将经济调度总体经济调度模型的目标函数和约束条件进行分布式处理后即可得到个体经济调度模型,由于个体经济调度模型间存在总功率平衡约束,因此每个发电单元求解个体经济调度模型时需综合其他单元的信息。

2.3.1 分布式梯度算法

分布式梯度算法是解决凸优化问题中最简单常用的算法之一,分布式梯度下降算法在分布式计算模式下影响最为深远且应用也最为广泛,例如分布式传感器网络等领域^[22]。在分布式梯度算法计算中通常借助于多智能体理论,而各个智能体之间连接关系通常用“图”来表示,因此图论被广泛应用于研究多智能体系统的相关性质^[23]。

用图 G 表示一个多智能体网络的拓扑结构。 $G=(V,E,A)$,其中 $V=\{1,2,\dots,z\}$ 为顶点的集合, z 为顶点总数, $E \subseteq V \times V$ 为边的集合, A 为图的邻接矩阵; $N_u=\{v \in V: (u,v) \in E\}$ 为与顶点 u 相邻的顶点集合, v 为智能体编号。图 G 中的顶点对应系统的智能体,在含 z 个智能体的系统中,分布式梯度算法可表示为^[24]:

$$x_u(k+1) = \sum_{v \in N_u} w_{uv} x_u(k) - \varepsilon \nabla f_u(x_u(k)) \quad (10)$$

其中, $x_u(k)$ 为第 u 个智能体在第 k 次迭代时的状态; w_{uv} 为信息交换权重矩阵的元素; $f_u(x)$ 为第 u 个智能体的局部目标函数; ∇ 为梯度函数; ε 为迭代步长。

式(10)可分为两部分,后一部分对每个节点都采用梯度下降法来极小化本地函数,从而极小化全局目标函数,而前一部分使所有节点状态最终收敛至一致的最优解。该算法借鉴了流言算法的思想,每个节点对自身和所有的邻居节点信息求加权平均,以满足各个节点变量相等的条件。

2.3.2 一致性算法

随着多智能体在众多领域得到广泛应用,多智能体的分布式控制方法得到了极大关注。通常求解此类问题的关键是找到合适的协调控制律,使得系统中智能体的某个变量趋于相同的值,又称为一致性问题^[25-26]。目前分布式一致性优化控制在队形控制^[27]、传感器网络^[28]、拥塞控制^[29]和协调控制^[30]等领域都取得了广泛应用。在分布式经济调度中,一致性算法相较其他分布式算法应用得更为广泛。

一致性问题在计算机科学领域有着悠久的历史,并为分布式计算奠定了基础。20世纪60年代,一致性问题在管理学和统计学上正式被研究,二十年后,一致性思想开始出现在传感器领域等。经过几十年的发展,一致性理论在分布式计算与控制系统中占据重要位置^[31]。

在智能体网络中,一致性算法(或协议)是一种交互规则,用于指定智能体与其网络上的所有邻居之间的信息交换。考虑一个一阶连续时间一致性协议,第 u 个智能体系统动态特性可表示为^[32]:

$$\dot{x}_u(t) = \kappa_u(t) = \sum_{v \in N_u} (x_u(t) - x_v(t)) \quad (11)$$

其中, $\kappa_u(t)$ 为第 u 个智能体的控制输入; $\dot{x}_u(t)$ 为第 u 个智能体在时间 t 的变化量。

式(11)的矩阵形式为:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = -L\mathbf{x}(t) \quad (12)$$

其中, L 为图 G 的拉普拉斯矩阵,定义如式(13)所示。

$$L = D - A \quad (13)$$

其中, $D = \text{diag}(|N_1|, |N_2|, \dots, |N_z|)$ 为图 G 的度矩阵。邻接矩阵 A 的元素定义如下:

$$a_{uv} = \begin{cases} 1 & v \in N_u \\ 0 & v \notin N_u \end{cases} \quad (14)$$

对于无向图(即 $a_{uv}=a_{vu}$),拉普拉斯矩阵满足平方和性质^[33]:

$$\mathbf{x}^T L \mathbf{x} = \frac{1}{2} \sum_{(u,v) \in E} a_{uv} (x_u(t) - x_v(t))^2 \quad (15)$$

定义二次不一致函数为:

$$\varphi = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T L \mathbf{x} \quad (16)$$

显然,式(11)与 $\dot{\mathbf{x}} = -\nabla \varphi(\mathbf{x})$ 相同,即梯度下降算法,则分布式一致性算法与分布式梯度算法基本原理是相同的。

离散时间一阶系统一致性协议可表示为:

$$x_u(k+1) = x_u(k) + \kappa_u(k) = x_u(k) + \sum_{v \in N_u} (x_u(k) - x_v(k)) \quad (17)$$

上式可写为马尔科夫链形式:

$$\mathbf{x}(k+1) = P\mathbf{x}(k) \quad (18)$$

其中, $\mathbf{x}(k)=[x_1(k), x_2(k), \dots, x_z(k)]^T$; P 为一个非负行随机矩阵。式(17)可进一步表示为:

$$x_u(k+1) = \sum_{v=1}^z p_{uv} x_u(k) = x_u(k) + \sum_{v \neq u} (x_v(k) - x_u(k)) \quad (19)$$

其中, p_{uv} 为矩阵 P 第 u 行第 v 列的元素。

对给定的一致性协议(如式(11)、(17)),各智能体通过邻居智能体信息不断迭代更新自身状态,最终所有智能体状态达到一致,即:

$$x_1 = x_2 = \dots = x_z \quad (20)$$

综上所述,分布式一致性算法就是通过某种一

致性机制,使得多智能体系统状态变量收敛到一致值。而针对系统的不同要求,则需要给出不同的一致性算法使系统收敛到给定的一致性目标。文献[25,34]给出了几种常见的一致性协议,不同的协议代表了智能体间不同的信息交互规则,最终影响到系统收敛方向和速度等,因此对一致性协议的分析设计一直是分布式优化控制研究中的重点。文献[35-37]针对一致性算法在时间模型、拓扑结构、通信等方面进行了研究。

2.3.3 交替方向乘子法

交替方向乘子法 ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) 最早在 20 世纪 70 年代被提出,其是对偶分解法和增广拉格朗日乘子法的结合,因此具有乘子法的鲁棒性和对偶分解的分布式计算能力,在电力系统控制与优化上也得到了广泛应用。本节只对其原理做出简要概述,更详细的说明见文献[38]。

ADMM 可解决问题的形式为:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{y}) \\ \text{s.t. } \mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} + \mathbf{B}_{\text{eq}} \mathbf{y} = \mathbf{c} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 为决策变量,为向量; $\mathbf{A}_{\text{eq}}$ 和 $\mathbf{B}_{\text{eq}}$ 为所求问题等式约束的系数矩阵; $\mathbf{c}$ 为相关向量; $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{y})$ 为相关目标函数。基于增广拉格朗日乘子的 ADMM 为:

$$L_{\rho} = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{y}) + \boldsymbol{\mu}^T (\mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} + \mathbf{B}_{\text{eq}} \mathbf{y} - \mathbf{c}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} + \mathbf{B}_{\text{eq}} \mathbf{y} - \mathbf{c}\|_2^2 \quad (22)$$

其中, $\boldsymbol{\mu}$ 为对偶变量,为向量; $\rho > 0$ 为惩罚参数。

ADMM 迭代过程为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^{k+1} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} L_{\rho}(\mathbf{x}, \mathbf{y}^k, \boldsymbol{\mu}^k) \\ \mathbf{y}^{k+1} = \underset{\mathbf{y}}{\operatorname{argmin}} L_{\rho}(\mathbf{x}^{k+1}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\mu}^k) \\ \boldsymbol{\mu}^{k+1} = \boldsymbol{\mu}^k + \rho (\mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x}^{k+1} + \mathbf{B}_{\text{eq}} \mathbf{y}^{k+1} - \mathbf{c}) \end{cases} \quad (23)$$

其中, k 为迭代次数; 函数 $\operatorname{argmin}(\cdot)$ 为取得最小值时自变量的值。

由式(23)可知,决策变量 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 是独立更新的,因此与梯度算法类似,可以看作是将目标函数进行分解,再本地分别求取各自的最优值从而得到全局最优解。若目标函数 $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{y})$ 是凸的,则能保证目标值收敛到最小值,而收敛速度取决于 ρ 的选择,文献[38]提出了选择该参数的不同策略。此外式(23)表明对偶变量的更新需要中央协调器,因此 ADMM 更多地被认为是分散式算法而非是分布式算法。

2.3.4 投影算法

投影算法主要用于处理个体约束。在经济调度问题中,若忽略单元发电功率约束则每个智能体的

约束条件 X'_k 是完全相同的,如 $\sum_{i=1}^n P_{Gi} = P_D$ 。这可被视为 Hilbert 空间中的“ N 维”平面,法向量 $\mathbf{n} = [1, \dots, 1]^T \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 。对给定该平面上的点 $\mathbf{p}_0 = [P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn}]^T$ 的投影为:

$$P_{X'_k}[\mathbf{p}_0] = \mathbf{p}_0 - \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{p}_0 - P_D}{N} \mathbf{n} \quad (24)$$

显然,如果 $\mathbf{p}_0 \in X'_k$, 那么 $P_{X'_k}[\mathbf{p}_0] = \mathbf{p}_0$ 。

考虑发电功率约束式(7),则通常需要采用投影操作以满足边界约束。令 $\mathbf{p}_1 = P_{X'_k}[\mathbf{p}_0]$, 如果 $(\mathbf{p}_1)_r > P_{Gr}^{\max}$ 或 $(\mathbf{p}_1)_r < P_{Gr}^{\min}$, 则令 $(\mathbf{p}_1)_r = P_{Gr}^{\max}$ 或 $(\mathbf{p}_1)_r = P_{Gr}^{\min}$, 其中 $(\cdot)_r$ 为括号内向量的第 r 个元素。令 $\mathbf{p}_2 \in \mathbf{R}^{(n-1) \times 1}$ 为除去 $(\mathbf{p}_1)_r$ 之后的向量,即 $\mathbf{p}_2 = [P_{G1}, \dots, P_{G(r-1)}, P_{G(r+1)}, \dots, P_{Gn}]^T$, 那么关于 $\mathbf{p}_2$ 的新约束表示为 X''_k , 即 $\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_{Gr} = P_D - P_{Gr}^{\max}$ 或 $\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_{Gr} = P_D - P_{Gr}^{\min}$, 则投影操作表示为:

$$P_{X''_k}[\mathbf{p}_2] = \begin{cases} \mathbf{p}_2 - \frac{\mathbf{n}'^T \mathbf{p}_2 - P_D + P_{Gr}^{\max}}{N-1} \mathbf{n}' & (\mathbf{p}_1)_r > P_{Gr}^{\max} \\ \mathbf{p}_2 - \frac{\mathbf{n}'^T \mathbf{p}_2 - P_D + P_{Gr}^{\min}}{N-1} \mathbf{n}' & (\mathbf{p}_1)_r < P_{Gr}^{\min} \end{cases} \quad (25)$$

其中, $\mathbf{n}' = [1, \dots, 1]^T \in \mathbf{R}^{(n-1) \times 1}$, 令 $\mathbf{p}_3 = P_{X''_k}[\mathbf{p}_2]$, 则关于 $\mathbf{p}_0$ 的边界约束投影结果为将 $(\mathbf{p}_1)_r$ 插入到 $\mathbf{p}_3$ 的第 k 个位置,即:

$$P_{X''_k}[\mathbf{p}_0] = [(\mathbf{p}_3)_1, \dots, (\mathbf{p}_3)_{r-1}, (\mathbf{p}_1)_r, (\mathbf{p}_3)_{r+1}, \dots, (\mathbf{p}_3)_{n-1}]^T \quad (26)$$

2.4 分布式经济调度问题的求解

由于目前一致性算法在分布式经济调度中占据主要位置,因此本节重点对基于一致性算法的分布式经济调度策略进行了综述,首先对一致性算法的原理及一致性变量的选择进行了说明,然后针对 Leader-Follower 和完全分布式经济调度 2 种模型进行了阐述与比较,最后总结分布式梯度算法与 ADMM 在分布式经济调度中的应用情况,并通过比较得出一致性算法在经济调度问题上的主要优势。

2.4.1 分布式经济调度的一致性变量

由 2.1 节中分析可知,经济调度是一个基本的凸优化问题,且目标函数连续可导,因此在目标函数 F 对自变量 P_{Gi} 偏导一致时取得最小值。又由于各个局部目标函数间不存在耦合,因此 F_i 对 P_{Gi} 的偏导即是本地目标函数 $F_i(P_{Gi})$ 对 P_{Gi} 的导数,即机组 i 的成本微增率。由此可知,当发电机组成本微增率达到一致时即可获得经济调度问题最优解。因此将机组成本微增率设计为一致性变量,利用一致性算法进行分布式求解是目前分布式经济调度问题求解的主要方法。

当机组成本函数含有更高次幂函数时,微增成本一致依然是经济调度问题获得最优解的必要条件,但在求解过程中可能出现负数解,需要剔除。文献[17]成本函数除二次函数外还有含不完全 Γ 函数风电,其最优解依然由成本微增率相等时得到。

采用分布式一致性算法求解经济调度问题时各智能体间仅传输一致性变量(通常为成本微增率),而各机组出力、参数等仅由自身得到,在个体私密信息保护方面具有较好的优越性。

2.4.2 Leader-Follower分布式经济调度

考虑二次凸函数为成本函数,以及约束条件式(6)、(7),采用拉格朗日乘子法将目标函数改写为:

$$\begin{cases} \min F = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi}) + \lambda \Delta P \\ \text{s.t. } P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (27)$$

其中, λ 为拉格朗日乘子。

对 λ 及 P_{Gi} 求偏导并令其等于0,可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} = \frac{dC_i}{dP_{Gi}} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = 0 \end{cases} \quad (28)$$

由于成本函数为凸函数,联立上式求解可知所有机组微增成本一致时达到最优经济调度。Leader-Follower分布式经济调度^[39]的主要思路就是以 λ 为一致性变量,采用分布式一致性算法求得最优经济调度下等成本微增率 λ^* 。其中需选取一个领导者(文献[40]提出以特征向量中心指数为领导的选择依据),以系统功率偏差对整个系统进行牵制控制,即:

$$\lambda_i(k+1) = \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} \lambda_j(k) + \varepsilon \Delta P & \text{领导者} \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} \lambda_j(k) & \text{跟随者} \end{cases} \quad (29)$$

其中, λ_i 为机组 i 的微增成本; a_{ij} 为邻接矩阵 A 中的元素;迭代步长 ε 是一个正标量,若取值过小则收敛速度慢,若取值过大则不收敛^[12,21]。

各智能体通过式(29)更新自身一致性变量值,并通过式(30)计算发电机输出功率:

$$P_{Gi}(k) = \begin{cases} P_{Gi}^{\min} & \frac{\lambda_i(k) - b_i}{2a_i} \leq P_{Gi}^{\min} \\ \frac{\lambda_i(k) - b_i}{2a_i} & P_{Gi}^{\min} \leq \frac{\lambda_i(k) - b_i}{2a_i} \leq P_{Gi}^{\max} \\ P_{Gi}^{\max} & \frac{\lambda_i(k) - b_i}{2a_i} \geq P_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (30)$$

直至系统满足功率平衡,即 $\Delta P=0$,所有智能体一致性变量收敛到 λ^* 。并且由2.3.4节中分析可知,

计入不等式约束的分布式一致性经济调度算法实质上就是梯度投影算法,其基本流程如图3所示。

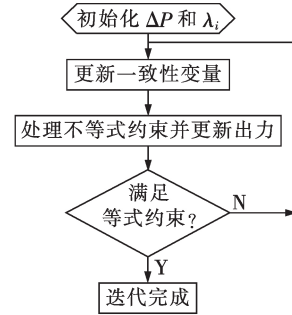


图3 分布式经济调度流程图

Fig.3 Flowchart of distributed economic dispatch

通过式(29)不难发现,Leader-Follower分布式经济调度中“领导者”需要实时获得全局变量 ΔP ,不是一种完全意义上的分布式经济调度,但与传统集中式经济调度相比,它的“分布式”体现在以下2个方面^[7]。

(1)“分布式”信息。在集中式经济调度中所有机组的信息如成本系数、排放系数等都需要汇总到调度中心,而这些信息都属于机密信息,一旦调度中心受到安全攻击,则会造成海量商业信息泄露,安全隐患大。而Leader-Follower分布式经济调度,发电机组的相关信息仅存放在对应的智能体中,即使遭受安全攻击泄露个别机组的信息,也不会危及整个系统,大幅降低了安全隐患。

(2)“分布式”计算。在集中式经济调度中,所有的计算任务都由调度中心完成,因此计算负担大。而Leader-Follower分布式经济调度计算任务由各个智能体分担,各智能体通过与相邻智能体通信计算各自的一致性变量,再计算得到机组的发电功率。

综上所述,Leader-Follower分布式经济调度虽然在计算和安全上具有一定优势,但是领导者如何获实时获得全局变量 ΔP 是一大难题,众多学者也注意到这个问题,并提出了相应改进方案。文献[41]提出基于两级增量成本一致性算法的分布式经济调度方案,但仍需知道全局变量 ΔP 。文献[42]首先推导出等成本微增率 λ^* 表达式,并将其拆分为3个部分进行一致性迭代计算,从而得到各机组最优发电功率分配。该方案迭代时无需得知系统功率差额,但领导者需要得知系统总负荷和节点数。文献[43]提出了虚拟Leader-Follower模式,并证明了在该模式下能够有效实现供应商和需求者之间的可靠协作,以确保最大收益。

2.4.3 完全分布式经济调度

在Leader-Follower分布式经济调度的基础上,更多学者将研究重点放在不需要领导者的完全分布

式经济调度上。文献[44]提出了一种不需要领导者的分布式一致性算法,该算法下智能体能够估计出负荷功率与发电功率的不匹配,并将估计的不匹配用作反馈机制,以调整每台发电机的当前发电量。文献[45]提出了一种新颖的分布式有限时间经济调度算法,能确保系统的增量成本在有限时间内收敛到最优值,并提高了分布式经济调度的求解速度。文献[46-47]提出了动态分布式经济调度方法,保证渐近找到有和没有发电机约束的经济调度问题解决方案。以上方法使得领导者的设定不再必要,构建了完全分布式经济调度问题计算框架,但以上方法均要求所有发电单元功率初始之和与总负荷相等,从而限制了该方法在负荷变动时的应用。

针对上述问题,文献[48]采用发电机所在母线以及相邻没有发电机的母线上的负荷作为反馈调整发电机输出功率。文献[49-50]在每条母线上匹配一个智能体,从而获取系统总的负荷和发电信息。但系统中通常母线数量大于发电机组数量,因此该方法需要更多数量的智能体和通信线路。文献[20]提出了“Consensus+Innovations”分布式控制策略,前一部分保证微增成本能够收敛到一致值,后一部分保证系统功率平衡,但该方法同样需要每条母线上匹配智能体。综上所述,对2种分布式经济调度模式对比如表2所示。

表2 2种分布式经济调度模式基本对比

Table 2 Comparison between two distributed economic dispatch modes

经济调度模式	牵制控制情况	主要优点	主要问题
Leader-Follower 分布式	领导者需要	原理简单、方便实现	需要全局变量;对领导者性能依赖大
完全分布式	通常不需要	实现了完全分布式计算	需要初始功率匹配或增加智能体数量以解决全局变量获取困难的问题

2.4.4 分布式梯度算法与ADMM在经济调度中的应用

分布式梯度算法作为处理凸优化问题的传统方法,在分布式经济调度中也有一定的应用。其基本思路为邻居智能体间交换梯度信息,本地求解局部目标的最优值,最优收敛到全局最优值。注意到该最优值下的梯度信息与一致性算法的等成本微增率相对应。

文献[51]提出了一种改进的分布式梯度法来处理经济调度的等式约束式(6)和不等式约束式(7),该方法对迭代步长的选择具有较高要求。文献[52]提出了基于 θ -对数障碍函数(θ 为与障碍函数相关的足够大的参数)的快速分布梯度法来求解经济调

度问题,但各分布式电源初始值需满足功率平衡约束。文献[53]则结合了梯度下降算法和一致算法,解决了分布式经济调度智能体信息交互过程中的隐私问题。

与一致性算法相比,分布式梯度法在分布式经济调度问题上应用较少,这是由于一致性算法在收敛速度、鲁棒性等方面具有更好的性能,并且形式更为灵活。

如前文所述,ADMM主要是应用于分散式经济调度。与Leader-Follower分布式经济调度不同,分散式经济调度不仅需要中央协调器获取功率不平衡的全局信息,并且各个智能体计算本地最优值时需知道所有其他智能体的决策变量值,仅仅解放了中央协调器的计算压力和在一定程度上保护了发电机组发电系数等信息隐私。

ADMM在电力系统控制优化上应用广泛,尤其在最优潮流问题上可应用于各种潮流模型。在经济调度方面,文献[54]提出了基于同步ADMM的分散式经济调度法,使得各个智能体计算本地最优值时只需获取上一次迭代后的平均值,提高了求解速度。文献[55]则将ADMM运用于动态经济调度分散式优化。

虽然ADMM具有较好的收敛性与鲁棒性,并且可以解决某些非凸问题,但其分散特性使其在经济调度上没有得到足够关注。文献[56]利用一种称为近端消息传递PMP(Proximal Message Passing)的方法修正简化了ADMM,从而可以不再需要中央协调器。而如何将ADMM应用于分布式经济调度,还需各学者和研究人员投入更多的研究。

对比分布式梯度法、ADMM与一致性算法。分布式梯度算法的实现过程简单,但与一致性算法相比收敛性、鲁棒性等性能较差,算法设计上灵活度不高;ADMM具有较好的收敛性与鲁棒性,并且可以解决某些非凸问题,但与一致性算法相比,ADMM需要中央协调器和更复杂的通信网络。

2.5 其他需考虑的问题

鲁棒性是多智能体系统最重要性能指标之一,因此分布式经济调度策略的鲁棒性也得到了初步关注。文献[7]提出鲁棒协同一致性算法RCCA(Robust Collaborative Consensus Algorithm),引入了一致性增益函数以抑制智能体之间通信延时、通信故障和通信噪声等,有效提高了系统鲁棒性。文献[57]考虑了真实世界中广泛存在的信息丢失问题,提出一种鲁棒等增量成本评估算法。文献[11]将分布式频率控制和最优经济调度方法应用于发电机输出功率控制,结果表明该算法相比传统算法具有更好的鲁棒性。

收敛速度不仅是评估分布式一致性算法优劣的

重要指标,还影响到多智能体系统的稳定性。文献[39]对所提出的分布式经济调度算法进行了收敛分析,但其结论仅依据仿真结果而未进行理论分析。也有学者提出了提高收敛速度的优化方法,主要有增加通信线路^[58]、优化通信线路权重^[59]和改进分布式算法^[60]等。文献[61]从通信拓扑结构设计、权重优化、领导节点位置选择3个方面进行优化,从而提高了虚拟发电厂分布式经济调度收敛速度。

不同的通信网络对分布式经济调度求解有不同影响,无向图可看作是有向图的一个特例,因而无向图情况下达到分布式一致性的要求相对较低^[62],但有向通信结构具有更好的拓展性^[50]。文献[63-64]分别研究了无向图和有向图下微增成本一致性问题。

高渗透率可再生能源的不确定性为经济调度带来不少挑战。在分布式经济调度中应对方法主要包括增加储能装置、通过微网汇聚更多可再生能源、提高对高渗透可再生能源输出功率预测精度等^[18,65]。相比于集中式调度,分布式模式下更有利于应对渗透可再生能源的不确定性,主要体现在:①将应对高渗透可再生能源的不确定性的问题分布式地交由各个调度主体独立解决,各个调度主体可根据自身情况独立采用各种技术手段应对不确定性,例如增加储能装置等,避免了集中式模式下全局考虑应对高渗透可再生能源的不确定性技术方法的复杂性;②各个调度主体可独立对高渗透可再生能源功率进行预测来应对其不确定性,并且从避免自身经济损失角度而言各个调度主体将努力提高其预测精度。

3 可能的研究方向

分布式经济调度以其独特的优势必将在未来高渗透分布式电源接入系统的经济调度中得到更多的应用。目前有关分布式经济调度的研究还需不断完善,主要体现在以下2个方面:一是分布式方法尚不能实现集中式方法的一些重要功能;二是分布式经济调度算法性能需要提高,如计算速率、鲁棒性等。结合当前分布式经济调度研究现状的分析,提出下一步研究重点及建议如下。

(1)考虑非凸目标函数及多目标函数的分布式经济调度。目前分布式经济调度主要是针对二次型凸成本函数,而实际电力系统中发电成本很多是非二次型的,甚至是非凸的。例如风机发电中通常要计及高估成本和低估成本,这使得风机成本函数不再是二次型凸函数。此外在理想状态下柴油机等的成本函数可用二次函数表示,而阀点效应、燃料选择和禁止工作区等因素,使其成本函数是非凸的^[13]。另外储能电池在电力系统的大量应用也使得经济调度更加复杂,目前研究只将储能电池看成普通电源而不考虑充放电限制,这显然是不够精确的。为

了提高分布式经济调度在电力系统的适用性,非凸成本函数情况下的研究是一个关键。

此外,兼顾环保节能、经济效益等多目标的新型经济调度是电力系统的研究热点,如文献[7]考虑了燃料排放量,但只用二次凸函数进行了简单的表示。因此如何兼顾环保节能(包括废气排放、可再生能源利用率等)和经济效益等多个相互冲突的目标,是分布式经济调度下一步发展需要考虑的问题。

(2)等式约束条件的有效处理方法。在功率平衡等式约束的处理中,一方面获取总负荷功率或负荷功率不平衡等全局信息方法的实用性较差;另一方面由于网损与整个系统运行状态有关,难以以分布式方法由个体测量或估算得到。据统计每年在输配电环节中的电能损失约为6%,而其中10%的损失是网络损耗。对于覆盖率大而负荷密度低的系统,网损可达到总负荷的20%~30%。这表明电力系统的网损巨大且不容忽视的。因此,未来在分布式经济调度中有效计入网络损耗是需要研究的问题之一。

(3)不等式约束条件的有效处理方法。相比于集中式经济调度,目前分布式经济调度考虑的不等式约束更少,通常只考虑发电功率约束,而潮流约束、运行电压约束、发电功率爬坡约束等同样重要的约束基本未得到考虑。主要原因仍然是难以有效以分布式方法由个体测量或估算得到所有支路潮流或节点电压的信息。因此,分布式经济调度还需深入研究不等式约束条件的有效处理方法,以满足电力系统的基本限制条件。

(4)提高分布式经济调度系统性能的方法。影响分布式经济调度系统鲁棒性、收敛速度、收敛精度等的因素相对集中式经济调度系统有较大差别。例如尽管每次通信量较低但每次迭代过程中均需进行多个个体的通信,通信系统实际可能出现的噪声干扰、通信延时、信息丢失、量化数据、拓扑切换等对分布式经济调度系统性能的影响反而比集中式系统要大;信息综合方法及分布式求解算法中的迭代步长、信息权重、信息同步机制等也是影响经济调度问题分布式求解速度和精度的重要因素。目前对这些问题还缺乏系统性分析和研究,借助分布式控制领域相关理论和分析技术,设计提高分布式经济调度系统性能的方法是下一步需重点开展的研究。

(5)考虑信息安全的分布式经济调度方法研究。相比集中式经济调度,分布式经济调度模式下的信息安全问题更为突出。与其他电力控制系统相同,局部通信网络容易遭受来自外部的恶意攻击;此外,新能源发电单元具有所有权/调度权/控制权高度分散的特点,参与经济调度的发电单元可能是竞争关系,一方面导致保护个体机密信息的要求上升到

前所未有的高度,要求设计相应的分布式经济调度算法和安全保护机制,尽量减少交换个体机密信息的数量,同时减少机密信息的传播范围;另一方面也可能导致某些个体交换对自身有利的虚假信息以博取更大利益,因此研究合作博弈框架下具有虚假信息发现及纠正功能的经济调度方法也是未来值得关注的内容。

4 结论

本文对基于一致性算法的电力系统分布式经济调度方法进行了综述,通过与传统集中式经济调度系统结构及求解过程的比较,指出了分布式经济调度实现的关键环节,并对各关键环节现有解决方法进行了重点评述。研究表明,一致性算法是分布式经济调度中的研究重点,后续研究需进一步考虑多样性目标,重点解决约束条件的分布式处理方法,并且需加强提高分布式经济调度系统性能方法的研究,同时针对性开展涉及信息安全的分布式经济调度方法研究。

参考文献:

- [1] 刘天琪,卢俊,何川,等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. 电力自动化设备, 2019,39(8):261-268.
LIU Tianqi, LU Jun, HE Chuan, et al. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(8): 261-268.
- [2] 乐健,柳永妍,叶曦,等. 含高渗透率分布式电能资源的区域电网市场化运营模式[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(12): 3343-3353.
LE Jian, LIU Yongyan, YE Xi, et al. Market-oriented operation pattern of regional power network integration with high penetration level of distributed energy resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(12):3343-3353.
- [3] 董志辉,林凌雪,管霖,等. 基于多代理技术的有源配电网供电恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2019,39(5):22-29.
DONG Zhihui, LIN Lingxue, GUAN Lin, et al. Service restoration strategy of active distribution network based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(5):22-29.
- [4] JADBABAIE A, LIN J, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003,48(6):988-1001.
- [5] 王兴隆,张淑婷,杨尚文. 基于复杂网络的空中交通系统影响力节点评估[J]. 指挥信息系统与技术, 2018,9(3):18-22.
WANG Xinglong, ZHANG Shuting, YANG Shangwen. Influential node evaluation of air traffic system based on complex network[J]. Command and Information System Technology, 2018,9(3):18-22.
- [6] 张梦凡,王冠中,史涔澂,等. 考虑通信噪声的电力系统分布式经济调度[J]. 电网技术, 2017,41(7):254-261.
ZHANG Mengfan, WANG Guanzhong, SHI Cenwei, et al. Distributed economic dispatch for power systems considering communication noise[J]. Power System Technology, 2017,41(7): 254-261.
- [7] 徐豪,张孝顺,余涛. 非理想通信网络条件下的经济调度鲁棒协同一致性算法[J]. 电力系统自动化, 2016,40(14):15-24.
XU Hao, ZHANG Xiaoshun, YU Tao. Robust collaborative consensus algorithm for economic dispatch under non-ideal communication network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(14):15-24.
- [8] 毛昱天,陈杰,方浩,等. 连通性保持下的多机器人系统分布式群集控制[J]. 控制理论与应用, 2014,31(10):1393-1403.
MAO Yutian, CHEN Jie, FANG Hao, et al. Decentralized flocking of multi-robot systems with connectivity maintenance[J]. Control Theory & Applications, 2014,31(10):1393-1403.
- [9] KAN Z, DANI A P, SHHEA J M, et al. Network connectivity preserving formation stabilization and obstacle avoidance via a decentralized controller[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012,57(7):1827-1832.
- [10] ZAVLANOS M M, EGERSTEDT M B, PAPPAS G J. Graph-theoretic connectivity control of mobile robot networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011,99(9):1525-1540.
- [11] MUDUMBAI R, DASGUPTA S, CHAO B B. Distributed control for optimal economic dispatch of a network of heterogeneous power generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012,27(4):1750-1760.
- [12] 谢俊,陈凯旋,岳东,等. 基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2016,36(2): 112-117.
XIE Jun, CHEN Kaixuan, YUE Dong, et al. Distributed economic dispatch based on consensus algorithm of multi agent system for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(2):112-117.
- [13] BINETTI G, DAVOUDI A, NASO D, et al. A distributed auction-based algorithm for the nonconvex economic dispatch problem[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014,10(2): 1124-1132.
- [14] 朱志键,王杰. 基于改进NSGA-II的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2017,37(2):176-183.
ZHU Zhijian, WANG Jie. Dynamic economic emission dispatch based on modified NSGA-II for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(2):176-183.
- [15] WANG M Q, GOOI H B, CHEN S X, et al. A mixed integer quadratic programming for dynamic economic dispatch with valve point effect[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014,29(5):2097-2106.
- [16] 丁丽. 基于多智能体系统微电网分布式控制研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2018.
DING Li. Research on distributed control of microgrid based on multi-agent systems[D]. Beijing: North China University of Technology, 2018.
- [17] GUO F, WEN C, MAO J, et al. Distributed economic dispatch for smart grids with random wind power[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017,7(3):1572-1583.
- [18] 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):1495-1501.
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): 1495-1501.
- [19] CAI J, MA X, LI L, et al. Chaotic particle swarm optimization for economic dispatch considering the generator constraints[J]. Energy Conversion & Management, 2007,48(2):645-653.
- [20] HUG G, KAR S, WU C. Consensus+innovations approach for distributed multiagent coordination in a microgrid[J]. IEEE

- Transactions on Smart Grid, 2017, 6(4):1893-1903.
- [21] BINETTI G, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed consensus-based economic dispatch with transmission losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4):1711-1720.
 - [22] 袁坤. 多智能体网络一致性问题的分布式算法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.
YUAN Kun. Decentralized algorithms for consensus problem in multi-agent network[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
 - [23] CAO Y, YU W, REN W, et al. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1):427-438.
 - [24] NEDIC A, OZDAGLAR A. Distributed subgradient methods for multi-agent optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(1):48-61.
 - [25] 龙慧, 樊晓平, 刘少强. 多智能体系统分布式一致性算法研究现状[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(1):36-42.
LONG Hui, FAN Xiaoping, LIU Shaoqiang. Review of distributed consensus problem in multi-agent system[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(1):36-42.
 - [26] QU Z, WANG J, HULL R A. Cooperative control of dynamical systems with application to autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(4):894-911.
 - [27] TIANG S T, MAHYUDDIN M N. Cooperative formation control algorithm of a generic multi-agent system applicable for multi-autonomous surface vehicles[C]//2016 IEEE International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). Penang, Malaysia: IEEE, 2016: 133-138.
 - [28] LU Q, HAN Q L, ZHANG B, et al. Cooperative control of mobile sensor networks for environmental monitoring: an event-triggered finite-time control scheme[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(12):4134-4147.
 - [29] TIAN Y P. Stability analysis and design of the second-order congestion control for networks with heterogeneous delays[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(5):1082-1093.
 - [30] ALIGHANBARI M, HOW J P. An unbiased Kalman consensus algorithm[C]//2006 American Control Conference. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2006: 3519-3524.
 - [31] OLFATI R, FAX J A, MURRY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1):215-233.
 - [32] SABER R O, MURRAY R M. Consensus protocols for networks of dynamic agents[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, USA: IEEE, 2003: 951-956.
 - [33] OLFATI S R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1):215-233.
 - [34] FENG X L, HUANG T Z, SHAO J L. Several consensus protocols with memory of multi-agent systems[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2013, 58(9-10):1625-1633.
 - [35] LIU Y, WANG S, MIN H, et al. Distributed finite-time regulation of a class of networked heterogeneous multi-agent systems[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2015, 13(1):65-72.
 - [36] YOU K, LI Z, XIE L. Consensus condition for linear multi-agent systems over randomly switching topologies[J]. Automatica, 2013, 49(10):3125-3132.
 - [37] KAR S, MOURA J M F. Distributed consensus algorithms in sensor networks: quantized data and random link failures[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3):1383-1400.
 - [38] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2010, 3(1):1-122.
 - [39] ZHANG Z, CHOW M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):1761-1768.
 - [40] ZHANG Z, CHOW M Y. The leader election criterion for decentralized economic dispatch using incremental cost consensus algorithm[C]//IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2011: 2730-2735.
 - [41] ZHANG Z, YING X, CHOW M Y. Decentralizing the economic dispatch problem using a two-level incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment[C]//North American Power Symposium. Boston, MA, USA: IEEE, 2011: 1-7.
 - [42] BINETTI G, ABOUHEAF M, LEWIS F, et al. Distributed solution for the economic dispatch problem[C]//21st Mediterranean Conference on Control and Automation. Chania, Greece: IEEE, 2013: 243-250.
 - [43] ZHANG X, BAO T, YU T, et al. Deep transfer Q-learning with virtual leader-follower for supply-demand Stackelberg game of smart grid[J]. Energy, 2017, 133:348-365.
 - [44] YANG S, TAN S, XU J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):4416-4426.
 - [45] 雷云娇. 微电网有限时间分布式经济调度算法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
LEI Yunjiao. Finite-time distributed economic dispatch of microgrids[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
 - [46] CHERUKURI A, CORTES J. Distributed generator coordination for initialization and anytime optimization in economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2015, 2(3):226-237.
 - [47] PANTOJA A, QUIJANO N, PASSINO K M. Dispatch of distributed generators under local-information constraints[C]//2014 American Control Conference. Portland, OR, USA: IEEE, 2014: 2682-2687.
 - [48] CHEN G, LEWIS F L, FENG E N, et al. Distributed optimal active power control of multiple generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11):7079-7090.
 - [49] 阮博, 俞德华, 李斯吾. 基于一致性的微网分布式能量管理调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15):23-28.
RUAN Bo, YU Dehua, LI Siwu. Consensus algorithm based distributed energy management strategy of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15):23-28.
 - [50] ZHAO C, HE J, CHENG P, et al. Consensus-based energy management in smart grid with transmission losses and directed communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5):2049-2061.
 - [51] ZHANG W, LIU W, WANG X, et al. Online optimal generation control based on constrained distributed gradient algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):35-45.
 - [52] LI C, YU X, YU W. Optimal economic dispatch by fast distributed gradient[C]//2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV). Singapore: IEEE, 2014: 571-576.
 - [53] 马锴, 于洋庆, 朱善迎, 等. 基于梯度下降和一致性的电网分布式经济调度算法[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(10):82-98.
MA Kai, YU Yangqing, ZHU Shanying, et al. Distributed algorithm for economic dispatch based on gradient descent and

- consensus in power grid[J]. Scientia Sinica Informations, 2018, 48(10):82-98.
- [54] 赵波,倪筹帷,李志浩,等.基于自适应步长的电-气混联系统多时间尺度优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 294-299.
- ZHAO Bo, NI Chouwei, LI Zhihao, et al. Multi-time scale optimal scheduling of electricity-gas hybrid system based on adaptive step size ADMM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 294-299.
- [55] 李佩杰,陆铺,白晓清,等.基于交替方向乘子法的动态经济调度分散式优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2428-2435.
- LI Peijie, LU Yong, BAI Xiaoqing, et al. Decentralized optimization for dynamic economic dispatch based on alternating direction method of multipliers[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2428-2435.
- [56] KRANING M, CHU E, LAVAEI J. Dynamic network energy management via proximal message passing[J]. Foundations and Trends in Optimization, 2014, 1(2): 73-126.
- [57] ZHANG Y, RAHBARI-ASR N, CHOW M Y. A robust distributed system incremental cost estimation algorithm for smart grid economic dispatch with communications information losses [J]. Journal of Network & Computer Applications, 2016, 59: 315-324.
- [58] XIN H, ZHANG M, 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): 4732-4741.
- [59] XIAO L, BOYD S. Fast linear iterations for distributed averaging[J]. Systems & Control Letters, 2004, 53(1): 65-78.
- [60] KOKIOPOULOU E, FROSSARD P. Polynomial filtering for fast convergence in distributed consensus[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 57(1): 342-354.
- [61] 赵亦岚,陈彬,范元亮,等.虚拟发电厂分布式控制收敛速度分析及优化[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2288-2294.
- ZHAO Yilan, CHEN Bin, FAN Yuanliang, et al. Convergence speed analysis and optimization for distributed control of virtual power plant[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2288-2294.
- [62] WANG J, DDUAN Z, WEN G. Distributed H robust control of uncertain linear multi-agent systems[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2015, 25(13): 2162-2179.
- [63] KAR S, HUG G. Distributed robust economic dispatch in power systems: a consensus+innovations approach[C] //2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [64] DOMINGUEZ-GARCIA A D, CADY S T, HADJICOSTIS C N. Decentralized optimal dispatch of distributed energy resources [C] //2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Maui, HI, USA: IEEE, 2012: 3688-3693.
- [65] NUTKANI I U, LOH P C, WANG P, et al. Decentralized economic dispatch scheme with online power reserve for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 8(1): 139-148.

作者简介:



乐 健

乐 健(1975—),男,湖北黄冈人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为智能电网运行与控制技术(E-mail: lej01@tsinghua.org.cn);

周 谦(1996—),男,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为分布式优化控制、分布式经济调度;

赵联港(1997—),男,山东滕州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分布式

经济调度;

王 阳(1994—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分布式经济调度。

(编辑 王欣竹)

Overview of distributed economic dispatch methods for power system based on consensus algorithm

LE Jian, ZHOU Qian, ZHAO Liangang, WANG Yang

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Traditional centralized dispatch methods are unable to meet the needs of power system economic dispatch in the context of high-permeability distributed energy resource access. Distributed economic dispatch scheme has received more and more attention due to its characteristics of high reliability, strong scalability and uniform communication and computation burden. The research statuses of distributed economic dispatch methods at home and abroad are reviewed. The principle and application of consensus algorithm and the reason why it becomes the dominant algorithm of distributed economic dispatch are emphasized. The centralized and distributed economic dispatch system and the problem solving process are compared. The points of the distributed economic dispatch process are analyzed, and both advantages and disadvantages of the existing methods are reviewed. The problems to be solved in the study of distributed economic dispatch method are analyzed and the possible further research directions are proposed.

Key words: electric power systems; economic dispatch; consensus algorithm; projection gradient algorithm; alternating direction method of multipliers; equal incremental cost