

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

谢俊^{1,2}, 陈凯旋^{1,2}, 岳东¹, 李亚平³, 王珂³, 翁盛煊¹, 黄崇鑫¹

(1. 南京邮电大学 先进技术研究院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023; 3. 中国电力科学研究院(南京), 江苏 南京 210003)

摘要: 集中式优化方法难以应对未来电网柔性负荷广泛渗透以及电力元件“即插即用”的技术要求。区别于集中式经济调度, 提出一种电力系统分布式经济调度策略。应用多智能体系统中的一致性算法, 以发电机组的增量成本和柔性负荷的增量效益作为一致性变量, 设计一种用于电力系统经济调度的算法, 通过分布式优化的方式求解经济调度问题。算例仿真与分析验证了所提调度策略的有效性。

关键词: 电力系统; 经济调度; 分布式优化; 多智能体系统; 一致性算法

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.018

0 引言

经济调度是电力系统运行中的一个基本问题, 它是指发电机和柔性负荷在满足一系列运行约束的条件下, 使整个电力系统运行的社会福利最大化的优化问题。传统上采用集中优化技术来解决经济调度问题, 其中包括经典优化方法^[1]和现代人工智能方法^[2-4]。

然而, 当采用集中优化方法时, 系统需要调度中心发布指令调度整个系统中所有的发电机和柔性负荷, 调度中心需要与每一个调度对象进行信息交互^[5]。并且, 柔性负荷的广泛渗透以及电力元件需要的“即插即用”技术将会使电力网和通信网拓扑结构多变^[6], 导致集中优化方法需要较高的通信拓扑建设成本。因此, 需要适应性更强的优化算法, 在通信受限和不可靠甚至调度中心失效的情况下仍能有效地运行^[7]。分布式优化为解决上述问题提供了新方法^[8-9]。

在分布式优化算法中, 一个基本的问题就是需要所有的节点都能达到一致, 即多智能体系统中的一致性^[10]。此类一致性问题已经在很多领域都进行了研究, 比如机器人系统^[11]、无人机系统^[12], 以及传感器网络系统^[13]。

多智能体系统的一致性算法能够应用于电力系统并实现其分布式优化运行^[8-9, 14-15]。电力系统是一系列可控电力设备(发电机和柔性负荷)的有机组合, 这些可控电力设备通过通信网络实现信息交互^[6]。

将发电机和柔性负荷建模为智能体, 进一步将电力系统建模为多智能体系统, 发电机和柔性负荷(智能体)通过局部通信网络与其他智能体进行信息交互, 实现整个电力系统(多智能系统)的协调优化运行。文献[8]提出了一种“Leader-Follower”分布式一致性算法; 文献[9]提出几种 Leader 的选择方法; 文献[14]提出了一种两层分布式一致性算法; 文献[15]通过创新项来实现完全分布式最优化。值得关注的是, 柔性负荷在电力系统中的渗透越来越广泛, 而上述文献都没有考虑经济调度中的柔性负荷。

本文介绍了一致性算法的基本概念, 应用一致性算法, 以发电机组的增量成本(IC)与柔性负荷的增量效益(IB)作为一致性变量, 设计一致性算法实现设计及柔性负荷的电力系统分布式经济调度, 算例仿真与分析表明了本文提出的分布式经济调度策略能够实现柔性负荷“即插即用”, 降低通信网投资, 有效应对通信网拓扑结构多变的问题。

1 图论与一致性算法

1.1 图论

令 G 表示系统的网络拓扑结构图。图 G 是一个集合 (V, E) , 其中 V 是图 G 中所有顶点的集合, 是一个有限的非空集合, 称为顶点集, E 是 V 中元素构成的无序二元组的集合, 称为边集。如果图中任意 2 个不同的顶点之间存在一条路径(该路径称为边), 那么该图是连通的。图的结构可以通过对称的 $n \times n$ 阶邻接矩阵 A 来表示, 该矩阵的元素 a_{ij} 是指顶点 i, j 之间边的权重。 N_i 表示顶点 i 的邻居顶点的集合(包括顶点 i), 与顶点 i 关联的边的数目之和为 d_i , 称为顶点 i 的度, 即 $d_i = |N_i|$ 。假设通信拓扑图的边满足双向并且等权重, 定义邻接矩阵 A 的元素 a_{ij} 为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1/d_i & j \in N_i \\ 0 & j \notin N_i \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2015-03-17; 修回日期: 2015-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207074); 国家电网公司重点科技项目(dz71-13-045)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207074) and the Key Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(dz71-13-045)

1.2 一致性算法

令 x_i 表示顶点 i 的状态。当且仅当网络中所有顶点的状态值都相等时,该网络的顶点都达到了一致^[16],即:

$$x_1 = x_2 = \cdots = x_n \quad (2)$$

定义线性系统一致性算法^[12]:

$$\dot{x}_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j) \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

该一致性算法的矩阵形式为:

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L}_n \mathbf{x} \quad (4)$$

其中, \mathbf{L}_n 为图 G 的 $n \times n$ 阶拉普拉斯矩阵, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 。

假设电力元件(发电机和柔性负荷)之间能够进行信息交互。因此,电力元件的状态特性可以表示为:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_j(k) - x_i(k))$$

由于矩阵 \mathbf{A} 为行随机矩阵,上式可简化为:

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j(k) \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

2 分布式经济调度策略

计及柔性负荷时,电力系统经济调度的目标是社会福利最大。本文从分布式优化的角度,应用一致性算法,将发电机组的 IC 与柔性负荷的 IB 作为一致性变量,经济调度问题通过分布式优化的方式求解。本地控制器(嵌入每一个发电机组和柔性负荷中)根据邻居的 IC 或者 IB 来更新自己的 IC 或者 IB。选择一个“主机组”和“主负荷”决策是否增大或减小全局 IC 和 IB。当发电机总发电功率大于负荷总需求功率时,就会减小全局的 IC,反之则增大。当负荷总需求功率大于发电机总发电功率时,就会增大全局的 IB,反之则减小。

假设发电机组的发电成本函数和柔性负荷的用电效益函数均为二次函数,发电机组的发电成本函数如下:

$$C_i(P_{Gi}) = \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 \quad i \in S_G \quad (6)$$

柔性负荷的用电效益函数如下:

$$B_j(P_{Dj}) = a_j + b_j P_{Dj} + c_j P_{Dj}^2 \quad j \in S_D \quad (7)$$

经济调度问题是指发电机和柔性负荷在满足一系列运行约束的条件下,使整个电力系统运行的经济效益最大化的优化问题,即:

$$\max \sum_{j \in S_D} B_j(P_{Dj}) - \sum_{i \in S_G} C_i(P_{Gi}) \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in S_D} P_{Dj} - \sum_{i \in S_G} P_{Gi} = 0 \quad (9)$$

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \quad i \in S_G \quad (10)$$

$$P_{Dj,\min} \leq P_{Dj} \leq P_{Dj,\max} \quad j \in S_D \quad (11)$$

其中, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 分别为发电成本函数的常数项、一次项

系数和二次项系数; a_j, b_j, c_j 分别为用电效益函数的常数项、一次项系数和二次项系数; P_{Dj} 为柔性负荷 j 的需求功率; P_{Gi} 为发电机组 i 的输出功率; S_G 为发电机集合; S_D 为柔性负载集合; $P_{Gi,\min}$ 与 $P_{Gi,\max}$ 分别为发电机的最小和最大输出功率; $P_{Dj,\min}$ 与 $P_{Dj,\max}$ 分别为柔性负荷的最小和最大输入功率。利用经典的拉格朗日乘子法求解,令 λ 代表与等式约束对应的拉格朗日乘子,不考虑约束式(10)和(11)时,上述等式约束优化问题可以转化为:

$$\min \Gamma = -\sum_{j \in S_D} B_j(P_{Dj}) + \sum_{i \in S_G} C_i(P_{Gi}) + \lambda \left(\sum_{j \in S_D} P_{Dj} - \sum_{i \in S_G} P_{Gi} \right) \quad (12)$$

对变量 P_{Gi}, P_{Dj} 和 λ 求偏导得到最优性条件,即:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Gamma}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}} - \lambda = 0 & i \in S_G \\ \frac{\partial \Gamma}{\partial P_{Dj}} = -\frac{\partial B_j}{\partial P_{Dj}} + \lambda = 0 & j \in S_D \\ \frac{\partial \Gamma}{\partial \lambda} = \sum_{j \in S_D} P_{Dj} - \sum_{i \in S_G} P_{Gi} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

上式即协调方程,根据协调方程可得:

$$\frac{\partial C_1}{\partial P_{G1}} = \frac{\partial C_2}{\partial P_{G2}} = \cdots = \frac{\partial C_m}{\partial P_{Gm}} = \frac{\partial B_1}{\partial P_{D1}} = \frac{\partial B_2}{\partial P_{D2}} = \cdots = \frac{\partial B_g}{\partial P_{Dg}} = \lambda \quad (14)$$

即经济调度的最优解是使发电机的 IC 与柔性负荷的 IB 相等,其中 m 表示发电机数目, g 表示柔性负荷的数目。

假设所有的柔性负荷与发电机组均在其功率约束范围内运行。在该一致性算法中,发电机组的 IC 与柔性负荷的 IB 的定义如下:

$$IC_i = \frac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}} = \lambda_i \quad i \in S_G \quad (15)$$

$$IB_j = \frac{\partial B_j(P_{Dj})}{\partial P_{Dj}} = \lambda_j \quad j \in S_D \quad (16)$$

选择 IC 与 IB 作为一致性变量,应用一致性算法,从发电机组的 IC 的更新公式为:

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{l=1}^n a_{il} \lambda_l(k) \quad i \in S_G \quad (17)$$

从负荷的 IB 的更新公式为:

$$\lambda_j(k+1) = \sum_{l=1}^n a_{jl} \lambda_l(k) \quad j \in S_D \quad (18)$$

为了满足电力系统中的功率平衡约束式(9),用 ΔP 表示柔性负荷实际需求功率与发电机组实际输出功率之间的差值:

$$\Delta P = \sum_{j \in S_D} P_{Dj} - \sum_{i \in S_G} P_{Gi} \quad (19)$$

主发电机组的 IC 的更新公式为:

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \lambda_j(k) + \varepsilon \Delta P \quad i \in S_G \quad (20)$$

主负荷的 IB 的更新公式为:

$$\lambda_j(k+1) = \sum_{l=1}^n a_{jl} \lambda_l(k) + \varepsilon \Delta P \quad j \in S_D \quad (21)$$

其中, ε 为收敛系数,是一个正的标量,它与主发电

机组和主负荷的分布式优化收敛速度有关。主发电机组或主负荷可以通过“中心性”检索来确定,包括度中心性、特征向量中心性、介数中心性以及紧密中心性等^[9]。

由式(15)和式(16)知:

$$P_{G_i} = \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \quad i \in S_G \quad (22)$$

$$P_{D_j} = \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} \quad j \in S_D \quad (23)$$

这样,发电机组的功率约束可以修改为:

$$P_{G_i}(k) = \begin{cases} \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} & P_{G_i, \min} \leq \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \leq P_{G_i, \max} \\ P_{G_i, \min} & \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \leq \lambda_{i, \min} \\ P_{G_i, \max} & \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \geq \lambda_{i, \max} \end{cases} \quad i \in S_G \quad (24)$$

柔性负荷的功率约束可以修改为:

$$P_{D_j}(k) = \begin{cases} \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} & P_{D_j, \min} \leq \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} \leq P_{D_j, \max} \\ P_{D_j, \min} & \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} \leq P_{D_j, \min} \\ P_{D_j, \max} & \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} \geq P_{D_j, \max} \end{cases} \quad j \in S_D \quad (25)$$

式(17)—(25)为基于一致性的分布式经济调度算法涉及的主要数学表达式,算法流程图见图1。

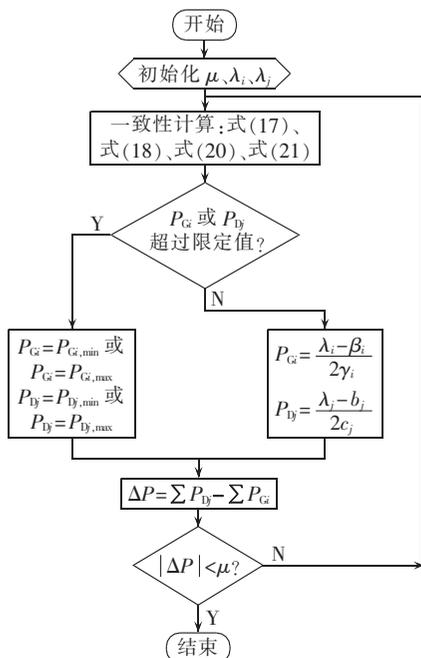


图1 分布式调度算法流程图

Fig.1 Flowchart of distributed dispatch algorithm

3 算例仿真与分析

为了验证该分布式调度算法的有效性,采用 IEEE 10机 19负荷 39节点系统进行仿真分析,其通信拓扑图如图2所示,其中,通信节点1—10分别代表发

电机 $G_1 \sim G_{10}$, 通信节点 11—29 分别代表柔性负荷 11—29。该系统包括 10 台发电机和 19 个柔性负荷,所有发电机和柔性负荷的参数如表 1 所示。

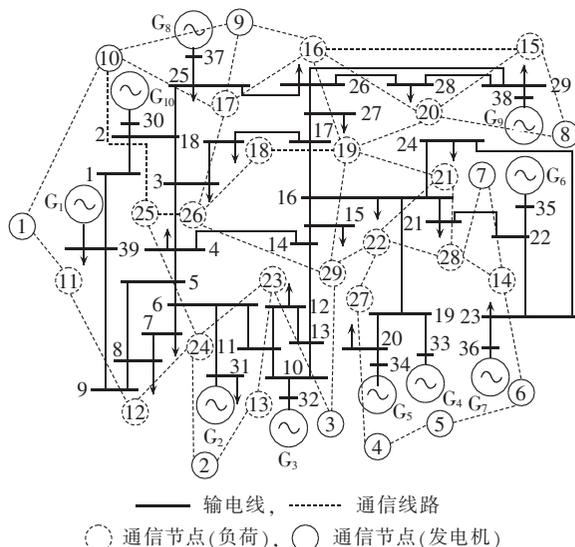


图2 10机 19负荷系统的通信拓扑(I)
Fig.2 Communication topology of 10-generator 19-load system(I)

表 1 10机 19负荷系统参数

Table 1 Parameters of 10-generator 19-load system

发电机	β_i	γ_i	$P_{G_i}(0)$
G_1	13.0650	0.0046	135.880
G_2	5.2950	0.0111	214.920
G_3	11.3700	0.0099	108.040
G_4	3.3600	0.0095	127.690
G_5	12.7950	0.0104	232.560
G_6	11.7750	0.0029	240.000
G_7	3.3750	0.0021	44.628
G_8	9.4350	0.0062	234.480
G_9	6.4500	0.0077	74.600
G_{10}	12.3900	0.0048	172.090
柔性负荷	b_j	c_j	$P_{D_j}(0)$
11	25.7550	-0.1402	110.15
12	18.4200	-0.0625	176.75
13	27.6300	-0.1510	109.69
14	10.5900	-0.0842	75.55
15	16.2750	-0.0810	120.64
16	28.3650	-0.2121	80.26
17	28.1400	-0.1190	142.02
18	23.5500	-0.1596	88.57
19	21.4200	-0.1275	100.80
20	15.2250	-0.0690	132.38
21	28.5600	-0.0975	175.75
22	10.3050	-0.0823	75.13
23	23.9400	-0.0928	154.69
24	22.0500	-0.0949	139.30
25	26.2500	-0.0910	172.85
26	16.4550	-0.3408	28.98
27	24.3750	-0.1836	79.67
28	26.2950	-0.1239	127.37
29	14.7600	-0.1304	67.92

提供了 4 种典型场景的仿真计算分析;场景 1 验证了该分布式调度算法与集中式调度算法一样,能收敛到最优解;场景 2 验证了该分布式调度策略对不同通信拓扑的适应性;场景 3 验证了该分布式调度策略能够有效应对电力元件功率约束发生作用的情形;场景 4 验证了该分布式调度策略能够使电力元件具备“即插即用”的能力。

集中式优化调度时,采用 λ 迭代法,该系统的经济调度最优解 $\lambda^*=9.62$ $\$/\text{MW}$ 。

场景 1:分布式优化调度的有效性。分布式优化调度时,选择 G_1 为主发电机组,柔性负荷 11 为主柔性负荷,其中采样步长为 0.02 s,收敛系数 $\varepsilon=0.005$,仿真结果如图 3 所示。从图 3 可见,系统最优运行点为 $\lambda^*=9.62$ $\$/\text{MW}$;系统中所有的一致性变量均收敛到最优值且系统总的供需功率达到平衡,分布式优化调度取得了与集中优化调度相同的优化结果。

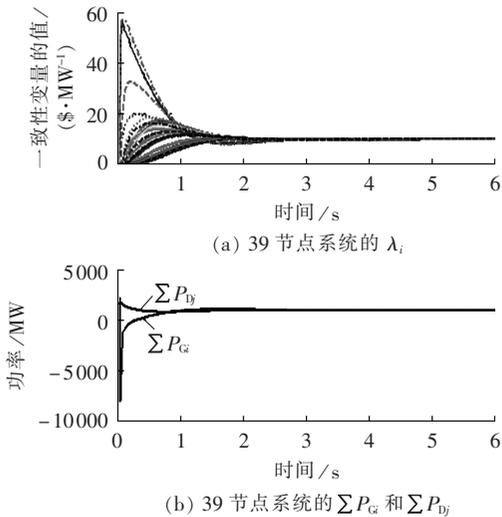


图 3 系统变量的仿真曲线(I)

Fig.3 Simulative curves of system variables(I)

场景 2:分布式优化调度对不同通信拓扑的有效性。改变系统的通信拓扑见图 4,仿真结果见图 5。由图 5 可见,尽管通信拓扑不同,但系统中的一致性变量依然能收敛到最优值 $\lambda^*=9.62$ $\$/\text{MW}$,并且系统中总的供需功率依旧达到平衡。

由于发电机和柔性负荷的功率函数 P_{Gi} 、 P_{Dj} 是一致性变量 λ 的单调函数,因此供需功率与一致性变量的收敛速度是同步的。比较图 2 和图 4 可见,相比于场景 1,场景 2 缺失了节点 26 与节点 29、节点 26 与节点 17,以及节点 17 与节点 16 之间的等 10 条通信线路。因此,场景 2 通信条件比场景 1 通信条件差。然而,虽然场景 2 的通信拓扑缺失了一些通信线路,但系统通信拓扑任然具备连通性。通过仿真可知,2 种场景下,系统的一致性变量和供需功率收敛速度是相同的。

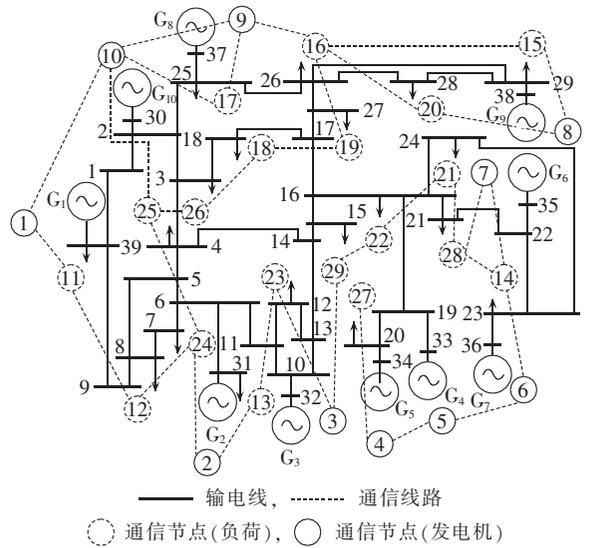


图 4 10 机 19 负荷系统的通信拓扑(II)

Fig.4 Communication topology of 10-generator 19-load system(II)

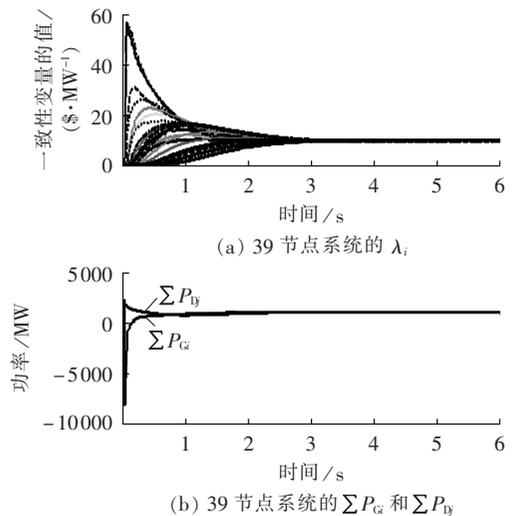


图 5 系统变量的仿真曲线(II)

Fig.5 Simulative curves of system variables(II)

场景 3:考虑柔性负荷和发电机输出功率受约束。以场景 1 中的通信拓扑为例,假设柔性负荷 11 的最小需求功率为 50 MW,发电机 G_2 的最小输出功率为 100 MW。仿真结果如图 6 所示,发电机的输出功率和柔性负荷的需求功率均受到功率约束,然而分布式调度依然收敛到最优值且系统的供需功率达到平衡。

场景 4:电力元件的“即插即用”能力。以场景 1 中的通信拓扑为例,假设在 $t=6$ s 时,柔性负荷 29 退出电网运行;在 $t=12$ s 时,将柔性负荷 29 重新并网,仿真图如图 7 所示。由图 7 可知,在 $t=6$ s 时,柔性负荷 29 退出电网运行,系统中所有一致性变量达到一个新的稳定运行点($\lambda^*=9.66$ $\$/\text{MW}$);在 $t=12$ s 时,柔性负荷 29 重新并网参与经济调度,系统重新收敛到柔性负荷 29 退出电网运行前的稳定运行点,即 $\lambda^*=9.62$ $\$/\text{MW}$ 。这表明该分布式调度算法可以很好地

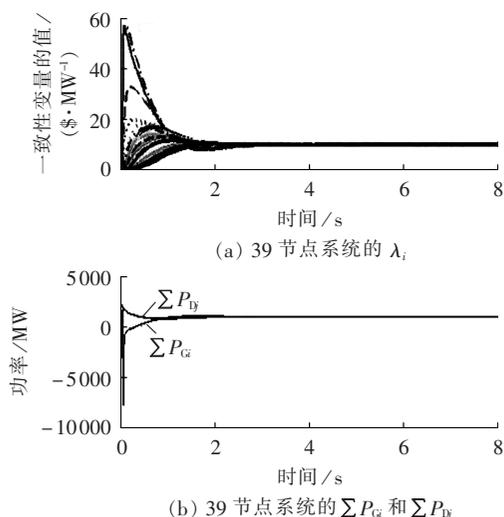


图 6 系统变量的仿真曲线(III)

Fig.6 Simulative curves of system variables(III)

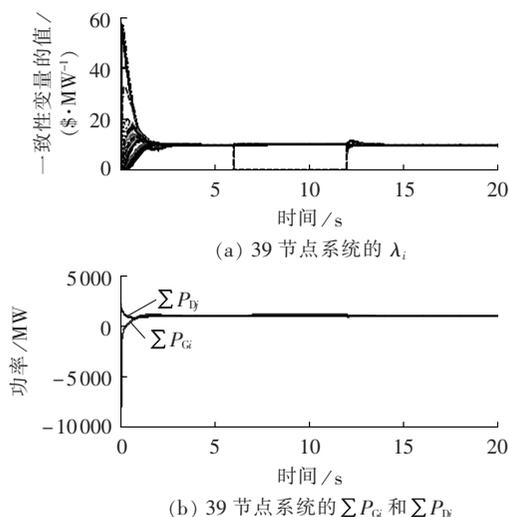


图 7 系统变量的仿真曲线(IV)

Fig.7 Simulative curves of system variables(IV)

适应电力系统对电力元件“即插即用”特性的要求。

由图 7 仿真曲线可见,柔性负荷退出电网运行比重新并网运行对一致性变量的影响小,而且比重新并网运行的供需功率再平衡速度更快。这是由于电力元件退出和并入电网运行, ΔP 的变化幅度不同。退出电网时柔性负荷 29 的功率 P_{D29} 已达到最优值 19.7 MW, ΔP 减小了 19.7 MW;当并入电网时,柔性负荷 29 的初始功率 P_{D29} 为 67.92 MW, ΔP 增加了 67.92 MW。因此,柔性负荷退出电网运行达到平衡的速率比重新并网运行达到平衡的速率要快。

从算例仿真可见,通信拓扑不同,系统的收敛速度存在差异。算法的参数配置会影响到经济调度算法的收敛速度,例如,主发电机组或主负荷的选择、采样速度、电网的通信拓扑结构、信息的传输延时等。主发电机组或主负荷通过 ΔP 来控制一致性变量 IC 或 IB 的增大或减小。收敛系数 ε 可以控制它们的收敛速度。算例仿真表明,对于同样的拓扑结构和采

样步长,当 $\varepsilon=0.02$ 时,系统是发散的、不稳定的;当 $\varepsilon=0.00001$ 时,系统是不收敛的;当 $\varepsilon=0.005$ 时,系统平稳收敛。

4 结论

本文从分布式优化的角度,应用多智能体系统中的一致性算法解决电力系统经济调度问题。算例仿真分析表明分布式优化调度算法具有很好的收敛性。

未来电网中柔性负荷大量渗透,用户不再仅仅是电网末端的刚性负荷,而是能够参与系统运行、实现与电源互动的柔性负荷。相比于集中式优化调度,在实现柔性负荷“即插即用”、降低通信网投资、应对通信网拓扑结构多变等方面,分布式优化调度在未来电网经济调度中具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] WOOD A J, WOLLENBERG B F. Power generation, operation, and control[M]. New York, USA: Knovel, 1996: 97-103.
- [2] 黄伟, 黄婷, 周欢, 等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 211-217.
HUANG Wei, HUANG Ting, ZHOU Huan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrid based on improved differential evolution algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 211-217.
- [3] 孙惠娟, 彭春华, 易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 123-128.
SUN huijuan, PENG chunhua, YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 123-128.
- [4] 纪昌明, 周婷, 向腾飞, 等. 基于网格搜索和交叉验证的支持向量机在梯级水电系统隐随机调度中的应用[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 125-131.
JI Changming, ZHOU Ting, XIANG Tengfei, et al. Application of support vector machine based on grid search and cross validation in implicit stochastic dispatch of cascaded hydropower stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 125-131.
- [5] ANDREA R D, DULLERUD G E. Distributed control design for spatially interconnected systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(3): 1478-1495.
- [6] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [7] BERTSEKAS D P, TSITSIKLIS J N. Parallel and distributed computation: numerical methods[M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1989: 159-162.
- [8] CHOW M Y, ZHANG Z. 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.
- [9] KAR S, HUG G. Distributed robust economic dispatch in power systems: a consensus+innovations approach[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, California, USA: IEEE, 2012: 1-8.

- [10] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [11] 吴正平, 关治洪, 吴先用. 基于一致性理论的多机器人系统队形控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1241-1244.
WU Zhengping, GUAN Zhihong, WU Xianyong. Consensus based formation control of multi robot system[J]. Control and Decision, 2007, 22(11): 1241-1244.
- [12] 袁利平, 陈宗基, 周锐, 等. 多无人机同时到达的分散化控制方法[J]. 航空学报, 2010, 31(4): 797-805.
YUAN Liping, CHEN Zongji, ZHOU Rui, et al. Decentralized control for simultaneous arrival of multiple UAVs[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 797-805.
- [13] 王长城, 戚国庆, 李银伢, 等. 传感器网络一致性分布式滤波算法[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(12): 1645-1650.
WANG Changcheng, QI Guoqing, LI Yinya, et al. Consensus-based distributed filtering algorithm in sensor networks [J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(12): 1645-1650.
- [14] ZHANG Z, CHOW M Y. The leader election criterion for decentralized economic dispatch using incremental cost consensus algorithm[C]//The 37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Melbourne, Vienna, Austria: IEEE, 2011: 2730-2735.
- [15] ZHANG Z, YING X C, CHOW M Y. Decentralizing the eco-

- mic dispatch problem using a two-level incremental cost consensus algorithm in a smart grid environment[C]//The North American Power Symposium. Boston, MA, USA: IEEE, 2011: 1-7.
- [16] LYNCH N A. Distributed algorithm[M]. Palo Alto, CA, USA: Ebrary, 1996: 325-329.

作者简介:



谢俊

谢俊(1979—),男,安徽安庆人,副教授,博士,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: eejxie@gmail.com);

陈凯旋(1991—),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: sdckx@sina.com);

岳东(1964—),男,河南郑州人,教授,博士,研究方向为智能电网运行与控制;

李亚平(1980—),女,江苏徐州人,高级工程师,博士研究生,研究方向为智能电网运行与控制;

王珂(1980—),女,江苏南京人,高级工程师,博士研究生,研究方向为智能电网运行与控制;

翁盛焯(1987—),男,湖北武汉人,讲师,博士,研究方向为智能电网运行与控制;

黄崇鑫(1984—),男,广西桂林人,讲师,博士,研究方向为电力系统运行与控制。

Distributed economic dispatch based on consensus algorithm of multi agent system for power system

XIE Jun^{1,2}, CHEN Kaixuan^{1,2}, YUE Dong¹, LI Yaping³, WANG Ke³,
WENG Shengxuan¹, HUANG Chongxin¹

(1. Institute of Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

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

3. China Electric Power Research Institute(Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: The centralized optimization methods could not cope with the widely-permeated flexible loads of future power grid and meet the requirements for the “plug-and-play” of power equipment, different from which, a strategy of distributed economic dispatch is proposed. An algorithm based on the consensus algorithm of multi agent system is designed to solve the economic power dispatch problem by the distributed optimization, which takes the increment cost of generation unit and the increment benefit of flexible load as the consensus variables. Case simulation and analysis show the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: electric power systems; economic dispatch; distributed optimization; multi agent systems; consensus algorithm