

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.011

电动汽车群自组织协调下垂调频控制方法

陈仲伟¹, 欧名勇¹, 谭玉东¹, 王逸超¹, 张允², 廉国海²

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410004;

2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:在规模化电动汽车接入电网背景下,协调控制电动汽车群的充放电功率,可使之成为对电网有益的储能调频工具。文中从剩余电量的角度研究了电动汽车集群的自组织分类方法,设计了一个自组织神经网络,将电动汽车群根据电量划分为几个在数学空间上相近的类。以聚类结果为基础,根据不同类中电动汽车的电量水平,提出一种自适应调节下垂系数的电动汽车充放电控制终端变参数下垂调频控制方法。仿真结果表明,应用文中提出的控制方法,规模化接入电网的不同电量水平的电动汽车将自组织地按各自容量比例分担电网峰值负荷、消纳电网富余电能,满足电网调频需求。

关键词:自组织特征映射;电动汽车;调频;下垂控制;控制策略

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)06-0077-07

0 引言

电动汽车(electric vehicle, EV)的大规模应用将给电网的运行模式带来新的变革和挑战。由于电动汽车接入电网充电的时间和地点都具有随机性和不确定性,一旦规模化接入电网,将给电网带来难以预估的影响^[1-2]。因此,迫切需要对电动汽车群充放电进行规划和控制,消除电动汽车随机充电对电网稳定性的不确定影响,使其成为对电网有益的储能工具。

在控制和调度电动汽车有序充放电方面,文献[3]提出了一种根据预测的电网负荷曲线,智能均衡电网负荷的电动汽车分时充电控制策略。文献[4-7]提出了根据预测的电网负荷曲线和风电功率曲线,通过调控电动汽车集群的充放电功率,提高新能源利用率的电网优化调度方法。上述方法高度依赖负荷和新能源预测精度。文献[8-9]提出了滚动调度方法,文献[10-14]提出了规模化电动汽车集中参与电网调度的方法。然而,这些方法依赖调度系统远程指挥,依赖电动汽车与主站之间的通信,一旦通信网络故障,则整个系统失效。文献[15-17]提出了以频率为控制信号,调节电动汽车的充放电功率为电网提供调频服务的控制方法,虽然能够实现一定程度的需求响应,但受容量限制不能充分支持对电网调频服务,且需要对现有电动汽车充电桩进行改造,带来额外的成本。文献[18]提出了一种微电网二次调频策略,通过设计下垂控

制器,确定系统的有功功率-频率平衡点,实现自动二次调频控制,具有很高的参考价值。

在以往研究的基础上,文中提出一种基于自组织特征映射(self-organizing map, SOM)神经网络的电动汽车群自组织协调下垂调频控制方法。通过提取电动汽车群剩余电量特征量进行学习,实现对种群规模和电量水平不断变化的电动汽车群的实时聚类,根据聚类结果制定控制策略,针对不同电动汽车类计算相应下垂控制参数,实现电动汽车群的协调控制。

1 基于 SOM 的电动汽车群自组织

1.1 SOM 分类网络原理

SOM 网络由输入层和计算层组成,其网络拓扑结构如图 1 所示。在 SOM 网络中,输入层接收样本,输入层的节点数决定了分类问题的维数;计算层实现对样本的分类,计算层节点数根据实际聚类问题决定。当 SOM 接收外界输入时,SOM 网络内部将形成不同的响应空间,各空间对输入有着不同的响应特性,邻近的神经元互相激励,较远的神经元互相抑制。对于某一个输入信号,SOM 中多个区域的神经元处于激活状态,学习过程将同时调整获胜神经元及其邻域内神经元对应的权值向量,使区域内各神经元权值保持向输入向量逼近的趋势,从而使具有相似特性的输入元素聚集在一起。输入层和计算层各神经元是全连接的,计算层各神经元按二维形式排列成节点矩阵,特征映射本质上就可以看作 n 维空间数据信息向 2 维平面的投影^[19-20]。

1.2 SOM 分类网络算法

SOM 网络分类算法^[21]如下:

收稿日期:2019-06-29;修回日期:2019-08-13

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5216A217000D)

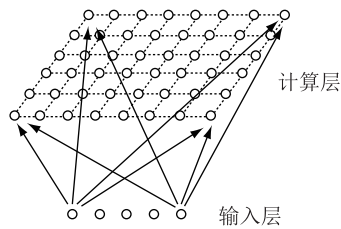


图1 SOM网络结构示意图

Fig.1 SOM network structure

(1) 初始化:所有输入层到计算层、以及计算层之间的神经元连接权值都赋以小的随机值,进行初始化。

(2) 输入:输入归一化样本 M 。

(3) 竞争:如果输入空间是 D 维,则输入模式可以写成 $\mathbf{x} = \{x_i: i=1, \dots, D\}$,输入单元 i 和神经元 j 之间在计算层的连接权重可以写成 $w_{ji} = \{w_{ji}: j=1, \dots, N; i=1, \dots, D\}$,其中 N 是神经元的总数。定义输入向量 \mathbf{x} 和每个神经元 j 的权向量 w_j 之间的平方欧几里德距离为判别函数,则具有最小判别函数值的特定神经元被宣布为胜利者。

$$d_j(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D (x_i - w_{ji})^2 \quad (1)$$

(4) 合作:给获胜的神经元定义优胜邻域。优胜邻域的设计原则是使邻域不断缩小,这样输出平面上相邻神经元对应的权向量之间既有区别又有相似性,从而保证当获胜节点对某一类模式产生最大响应时,其邻近节点也能产生较大响应。优胜邻域的大小用邻域半径表示,定义邻域半径为:

$$R(t) = Ne^{-B_1 t/t_m} \quad (2)$$

式中: t 为当前迭代次数; t_m 为总训练次数; B_1 为大于 1 的常数; N 为计算层神经元个数。

(5) 更新:对获胜神经元邻域内所有神经元的权重进行调整:

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta(t)e^{-P}(x_i - w_{ji}) \quad (3)$$

式中: $\eta(t)$ 为学习率,是关于训练迭代次数 t 的函数,用以调整神经元的权重。在刚开始时,学习率可以取值较大,之后随训练时间线性下降至 0 值,表达式如下:

$$\eta(t) = Ce^{-B_2 t/t_m} \quad (4)$$

式中: C 为 0~1 之间的常数; B_2 为大于 1 的常数。

(6) $t = t + 1$,如果达到终止条件,则训练结束,否则转到(3)。

1.3 电动汽车群自组织

由于规模化接入电网的电动汽车具有时空泛在特性,即不同时刻接入电网的电动汽车的总数量随时发生变化,而且即时接入的电动汽车剩余电量

也各不相同,难以有效同时管理。因此,需根据电动汽车数量和电量变化自动调整分类结果,做到“分而治之”。文中利用 SOM 神经网络结构简单、对输入模式自动聚类、容错性强、网络具有自稳定性的优点,通过提取泛在入网的电动汽车电量特征作为输入变量,将大量电动汽车根据其电量自组织地划分为几个在数学空间上相近的类。根据不同类中电动汽车的电量水平,有针对性的调节不同电动汽车类充放电接口的下垂控制特性,使电动汽车根据自身电量情况自动参与电网调频。随着充放电过程的调整,电动汽车电量不断更新,聚类也不断滚动更新。例如某辆电动汽车的当前电量是 79%,被划分到第四类中,10 min 后充到了 82%,这时通过滚动更新,该车被划分到第五类中,这时该车对应下垂控制系数就会实时调整,体现了“自适应”的特点。算法流程如图 2 所示。

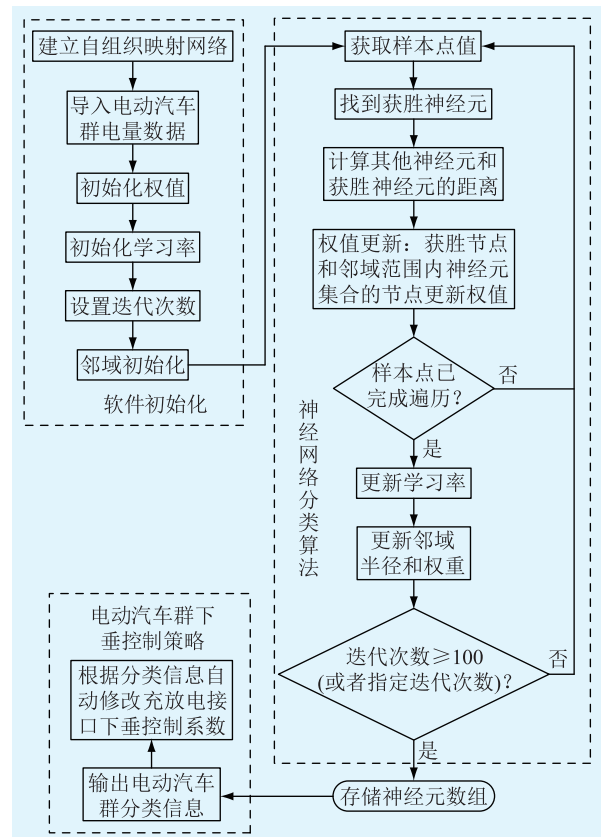


图2 电动汽车群自组织聚类算法流程

Fig.2 Flow chart of EV group self-organize clustering algorithm

2 电动汽车群下垂控制策略

当多辆电动汽车接入电网时,可以借鉴常规电力系统多台同步发电机并联运行的下垂工作特性对其充放电功率进行相应控制,实现自动调频功能。具有有功功率-频率下垂控制特性的变流功率

控制器又称为下垂控制器^[18],如图3所示。常规下垂控制具有模拟发电机调速器一次调频的能力,可解决幅度小、周期短的随机负荷波动带来的频率控制问题。

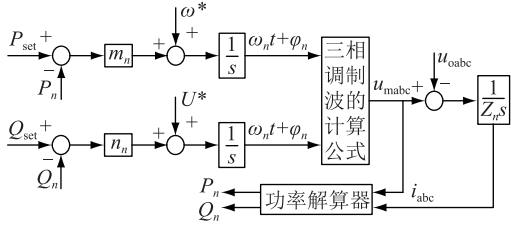


图3 常规下垂控制策略

Fig.3 General droop control strategy

图中, P_n, Q_n 分别为第 n 台逆变器输出的有功功率和无功功率; P_{set}, Q_{set} 分别为有功功率和无功功率设定值; m_n, n_n 分别为有功-频率下垂控制系数和无功-电压下垂控制系数; ω^*, U^* 分别为角频率和电压的额定值; ω_n, φ_n 分别为第 n 台逆变器对应电压调制信号的频率和相角; u_{mabc} 为控制算法输出的 abc 三相相电压调制值; u_{abc} 为反馈回的逆变器实际输出三相相电压值; i_{abc} 为反馈回的三相线电流值。

规模化接入电网的电动汽车群可看作是直接或者间接并联运行的同步发电机,各电动汽车并网双向逆变器之间可按各自容量成比例共享负载,即:

$$m_1 s_1 = m_2 s_2 \quad (5)$$

$$n_1 s_1 = n_2 s_2 \quad (6)$$

式中: s_1, s_2 分别为 2 台双向逆变器的额定容量; m_1, m_2, n_1, n_2 分别为频率控制环与电压控制环的下垂控制系数。为了使各逆变器按容量分担负荷,显然电压环系数与频率环系数之间成比例,因此只需关注频率环下垂系数整定方法即可。

在获得电动汽车群的分类信息之后,可以根据不同电动汽车的容量,按照电动汽车类计算下垂控制系数:

$$\begin{cases} m_i = C_{dp} S_i \\ C_{dp} = \frac{x\%}{\omega_n^2 y\%} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω_n 为电网额定角频率, C_{dp} 为每 $y\%$ 的频率波动带来 $x\%$ 的有功功率调整; S_i 为每类电动汽车的计算容量, $S_i = \tau E_i$, τ 为时间常数, E_i 由各电动汽车聚类中抽样得到:

$$E_i = \begin{cases} k\% E_{ni} & f \leq 50 \text{ Hz} \\ (1 - k\%) E_{ni} & f > 50 \text{ Hz} \end{cases} \quad (8)$$

式中: k 为电动汽车当前剩余电量的百分比值,其取值为 0~100; f 为电网频率; E_{ni} 为电动汽车额定容量。当频率小于等于 50 Hz 时,以电动汽车的剩余

电量作为可能放电的备用容量(电动汽车处于充电工况还是放电工况,由其初始功率给定值决定);当频率大于 50 Hz 时,以电动汽车吸收储能的富余能力作为充电的备用容量。

设调整后的下垂控制系数为 m'_i ,则整个系统的有功-频率下垂控制特性为:

$$P'_{sum} = \sum_{i=1}^N P_i + (\omega_n - \omega_e) \omega_n \left(\sum_{i=1}^N m_i - m_i + m'_i \right) \quad (9)$$

式中: P_i 为逆变器设定功率值,当该值为正时,电动汽车处于放电工况,否则处于充电工况; ω_e 为频率设定值。

值得说明的是,当电动汽车接近满充时,可接受的充放电功率急速下降,此时不应仅根据电网频率确定其充放电功率。事实上,电动汽车充电有两种模式,即恒流充电和恒压充电。为了防止过充,在电池电量非常低以及电池电量接近满充时,普遍采用恒压充电模式,即控制电池端电压为固定电压来进行充电,此时电动汽车的充电功率由电池端电压决定,随着电池逐渐充满,电池端电压与给定电压之间的差值越来越小,充电功率自然也就越来越低。在电池电量既不是非常低又不接近满充的情况下,电动汽车采用恒流充电模式,可应用文中控制方法调节功率。

3 算例仿真分析

3.1 电动汽车群自组织聚类

文中采用 Matlab/Simulink 平台进行仿真计算和算法验证。采用蒙特卡洛抽样方法,建立 60 辆电动汽车的剩余电量随机分布模型。设 60 辆电动汽车动力电池的额定容量均为 200 A·h,电池端电压为 300 V,最大充电功率为 -5 kW,最大放电功率为 5 kW。对这 60 辆电动汽车采用 SOM 算法根据其电量水平进行聚类,选取聚类数为 5 个,得到的聚类数值分布如图 4 所示,聚类结果如表 1 所示。图 4 中,蓝色的圈为输入数据,灰色的点为聚类中心。

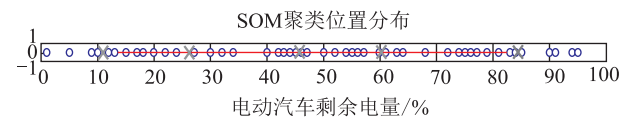


图4 归一化输入数据聚类结果

Fig.4 The result of normalized input data clustering

3.2 下垂调频控制

根据电动汽车群的聚类信息,从各电动汽车聚类中抽样得到 E_i ,设定逆变器功率值 P_i 为 -1 kW,逆变器及控制系统仿真参数如表 2 所示。

表 1 60 辆电动汽车电量分布模型
Table 1 Battery capacity distribution of electric vehicles

编号	剩余电量/%	分类	编号	剩余电量/%	分类	编号	剩余电量/%	分类
1	72	4	21	47	3	41	57	4
2	47	3	22	12	1	42	68	4
3	56	4	23	94	5	43	47	3
4	95	5	24	22	2	44	30	2
5	60	4	25	17	1	45	5	1
6	61	4	26	90	5	46	24	2
7	27	2	27	15	1	47	90	5
8	13	1	28	63	4	48	1	1
9	85	5	29	91	5	49	77	5
10	52	3	30	45	3	50	76	5
11	27	2	31	20	2	51	81	5
12	46	3	32	79	5	52	40	3
13	20	2	33	46	3	53	95	5
14	9	1	34	55	4	54	64	4
15	34	2	35	57	4	55	83	5
16	61	4	36	81	5	56	18	1
17	10	1	37	50	3	57	54	4
18	61	4	38	75	5	58	44	3
19	64	4	39	84	5	59	74	5
20	42	3	40	32	2	60	43	3

表 2 仿真系统参数

Table 2 System parameters in simulation

参数	数值	参数	数值
V_n/V	220	f_n/Hz	50
U_{dc}/V	700	Z_{gn}	0.1 Ω , 0.24 mH
$x/\%$	100	$y/\%$	0.5
τ	0.167	$E_{in}/(kW \cdot h)$	60
V_f/V	300	$Q/(A \cdot h)$	200
R_g/Ω	0.135	L_g/mH	0.45
R_s/Ω	0.045	L_s/mH	0.15

负载减小时,电动汽车随微电网频率变化调整有功功率的情况如图 5 所示,设置仿真时序如下:

- (1) 0~1 s,微电网频率为 50 Hz,各逆变器依次并网;
- (2) 2 s,设定逆变器有功功率 P_i 为 -1 kW;
- (3) 2~4 s,持续减小负载,微电网频率 > 50 Hz,验证各类电动汽车下垂控制调频效果;
- (4) 4 s,结束仿真。

第 2 s 负荷持续减小时,各类电动汽车输出有功功率均持续下降,且根据各类电动汽车的不同电量水平呈不同下降斜率。原因是电量高的电动汽车可吸收电能容量小,而电量低的电动汽车可吸收电能容量大,因此电网频率高于额定值时,电量高

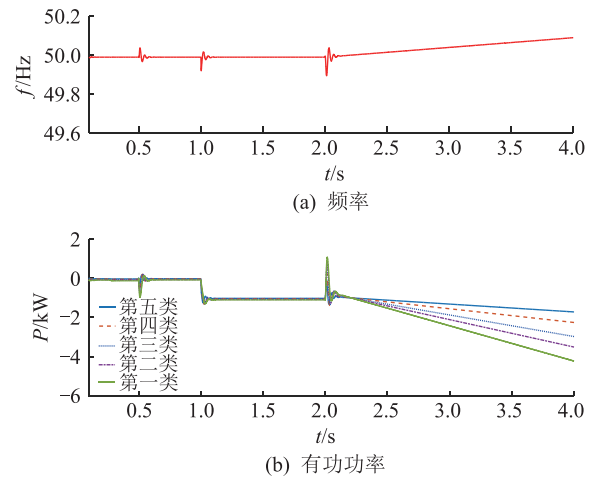


图 5 负载减小电动汽车调频仿真

Fig.5 Frequency modulation results of electric vehicles with load reduction

的电动汽车类吸收的有功功率值较电量低的电动汽车类小,体现了电动汽车自组织下垂调频控制的效果。

负载增大时,电动汽车随微电网频率变化调整有功功率的情况如图 6 所示,设置仿真时序如下:

- (1) 0~1 s,微电网频为 50 Hz,各逆变器依次并网;
- (2) 2 s,设定逆变器有功功率 P_i 为 -1 kW;
- (3) 2~4 s,持续加大负载,微电网频率 < 50 Hz,验证各类电动汽车下垂控制调频效果;
- (4) 4 s,结束仿真。

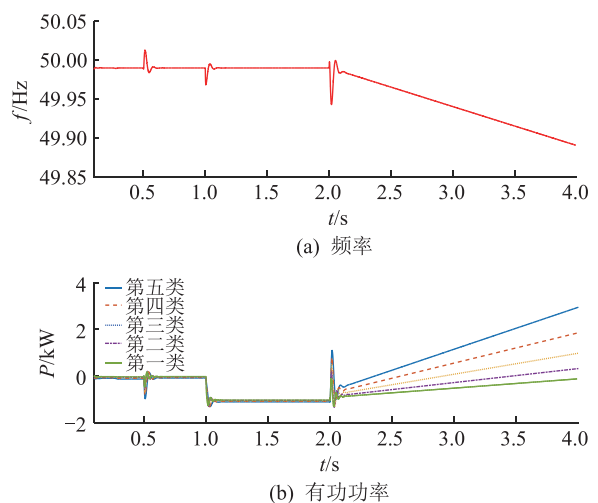


图 6 负载增大电动汽车调频仿真

Fig.6 Frequency modulation results of electric vehicles with load increase

第 2 s 负荷持续增大时,各类电动汽车输出有功功率均持续上升,电量高的电动汽车可释放电能较多,电量低的电动汽车可释放电能较少,因此电网频率低于额定值时,电量高的电动汽车类释放的

有功功率值较电量低的电动汽车类多,体现了电动汽车自组织下垂调频控制的效果。值得注意的是,第一类电动汽车由于电量值非常低,所以相应下垂特性斜率低,即使电网频率持续下降,该类电动汽车也只是将充电功率逐渐减小到0。

参照发电厂的原理,文中提出的控制策略调节电网频率的原理说明如下:在正常运行条件下,为了维持稳定,发电厂原动机,即汽轮机速度控制系统的转矩速度特性呈线性下降^[20],斜率为 $-1/R$,其中 R 为速度调节率,美国典型的速度调节率 R 为5%,欧洲 R 为4%,该线性调节特性符合公式:

$$T_m = T_{m0} + T_{m\Delta} = T_{m0} + (-\omega_{\Delta}/R) \quad (10)$$

式中: ω_{Δ} 为汽轮机转速变化量; T_m 为当前输出机械转矩; T_{m0} 为上一个时刻输出的初始机械转矩; $T_{m\Delta}$ 为负荷突增或者突减带来的转矩变化量。式(10)两端乘以额定转速 ω ,则有:

$$P_m = P_{m0} + (-\omega_{\Delta}/R)\omega \quad (11)$$

$$\omega_{\Delta} = -\frac{P_m - P_{m0}}{\omega}R = -\frac{\Delta P}{\omega}R \quad (12)$$

式中: P_m 为汽轮机输出的机械功率,即同步发电机输入的机械功率; ΔP 为负荷功率的变化量。由于 R 和 ω 都是常数,频率的变化量仅与负荷功率的变化有关。而电动汽车充放电功率就是叠加在 ΔP 上的变化量,充电时叠加在 ΔP 上的功率为正,放电时叠加的功率为负。显然,当电动汽车数量非常大时,能够起到频率调整的作用。

以下针对由电动汽车-风力发电机-负载组成的微电网系统进行电动汽车调频效果的分析,建立微电网联合调频仿真模型如图7所示。其中,电动汽车群规模为60辆,电量分布如表1所示。风力发电机容量为275 kV·A,风速由模拟器随机给定;负载包含一个50 kW主负荷和一个第2 s投入的25 kW额外负荷;系统还包含一台额定容量为300 kV·A的同步调相机。

仿真得到系统频率曲线如图8(a)所示。作为对比,令电动汽车群不参与系统调频,以充电负荷的形式接入电网时,该微电网频率曲线如图8(b)所示。

由图8可见,对于该含电动汽车-风力发电机-负载的微电网系统(荷兰博恩霍姆岛上EDISON项目的微电网系统正是这种结构),当电动汽车参与系统调频时,风电、负荷带来的系统频率波动可以很好的被电动汽车群阻尼,从而维持系统频率的相对稳定;而当电动汽车不参与系统调频时,系统频率难以保持稳定。

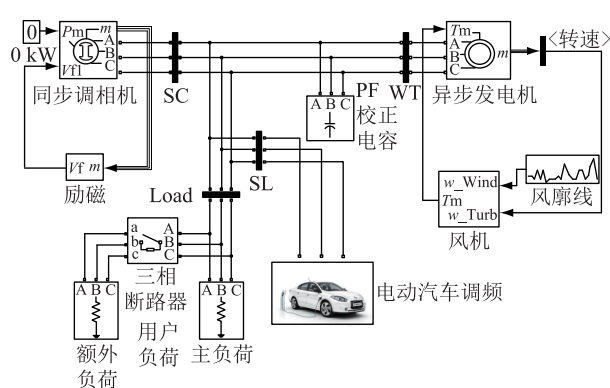
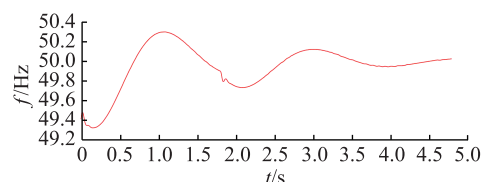
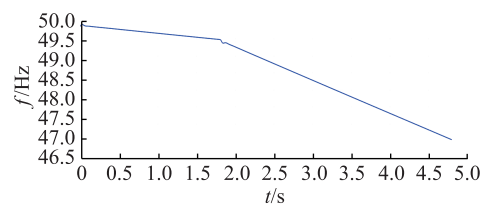


图7 含电动汽车-风力发电机-负载的微电网联合仿真模型

Fig.7 Joint simulation model of micro-grid with electric vehicle, wind generator and load



(a) 电动汽车参与调频时的系统频率



(b) 电动汽车不参与调频时的系统频率

图8 2种情况下含电动汽车-风力发电机-负载的微电网系统频率仿真结果

Fig.8 Frequency simulation results of micro-grid system with electric vehicle, wind generator and load in two cases

4 结论

文中提出了一种基于SOM神经网络聚类的电动汽车群自组织协调下垂调频控制方法,以剩余电量值为特征量,将泛在接入电网的电动汽车群划分为几个数学上相近的类。文中对常规下垂控制方法进行了改进,根据电动汽车的不同聚类结果,自适应调节功率控制器的下垂控制系数,使电动汽车充放电控制终端模拟同步发电机的虚拟下垂特性,从而使电动汽车实现调频功能。主要结论如下:

(1) 当电网频率小于或等于50 Hz时,应以电动汽车的剩余电量作为可能放电的备用容量;当电网频率大于50 Hz时以电动汽车吸收储能的富余能力作为充电的备用容量。

(2) 当电网频率大于50 Hz时,电量高的电动汽车类吸收的有功功率值较电量低的电动汽车类

小,根据电量水平呈不同下降斜率。

(3) 当电网频率小于或等于 50 Hz 时,电量高的电动汽车类吸收的有功功率值较电量低的电动汽车类大,根据电量水平呈不同上升斜率。

(4) 当电动汽车的数量足够大时,每辆电动汽车新提供或消纳的有功功率累积起来,可以起到调节电网频率的作用。

应用文中方法无需对现有电动汽车充电桩结构做任何改变,只需改变内部控制算法,具有良好的实用性和经济性。

本文得到湖南省教育厅优秀青年项目(17B0-06)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 管永高,牛涛,倪盼盼. 电动汽车直流充电桩接入对电网谐波的影响分析[J]. 电力需求侧管理,2017,19(3):10-14.
GUAN Yonggao, NIU Tao, NI Panpan. Study on the impact of electric vehicle DC chargers on power grid harmonics[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(3):10-14.
- [2] 许珊,李扬. 引导电动汽车有序充放电的峰谷电价时段优化模型[J]. 电力需求侧管理,2018,20(5):11-15.
XU Shan, LI Yang. An optimization model of peak valley price time interval for guiding the orderly charging and discharging of electric vehicles[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(5):11-15.
- [3] WANG B, HUANG R, WANG Y, et al. Predictive scheduling for electric vehicles considering uncertainty of load and user behaviors[C]//IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2016:1-5.
- [4] LIU D, WANG Y, SHEN Y. Electric vehicle charging and discharging coordination on distribution network using multi-objective particle swarm optimization and fuzzy decision making[J]. Energies, 2016, 9(3):186.
- [5] SHAO C, WANG X, WANG X, et al. Cooperative dispatch of wind generation and electric vehicles with battery storage capacity constraints in SCUC[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5):2219-2226.
- [6] 梁子鹏,陈皓勇,王勇超,等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术,2017,41(8):2647-2656.
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, WANG Yongchao, et al. Robust economic dispatch of microgrids containing electric vehicles[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2647-2656.
- [7] 张琨,葛少云,刘洪,等. 智能配电系统环境下的电动汽车调频竞标模型[J]. 电网技术,2016,40(9):2588-2595.
ZHANG Kun, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. A bidding model for electric vehicles to provide regulation services based on intelligent distribution system[J]. Power System Technology, 2016, 40(9):2588-2595.
- [8] MAYHORN E, XIE L, BUTLER P K. Multi-time scale coordination of distributed energy resources in isolated power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2):998-1005.
- [9] 王魁,张步涵,闫大威,等. 含大规模风电的电力系统多时间尺度滚动协调调度方法研究[J]. 电网技术, 2014, 38(9):2434-2440.
WANG Kui, ZHANG Buhuan, YAN Dawei, et al. A multi-time scale rolling coordination scheduling method for power grid integrated with large scale wind farm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2434-2440.
- [10] 刘东奇,王耀南,袁小芳. 电动汽车充放电与风力/火力发电系统的协同优化运行[J]. 电工技术学报,2017,32(3):18-26.
LIU Dongqi, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang. Cooperative dispatch of large-scale electric vehicles with wind-thermal power generating system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3):18-26.
- [11] ZHONG J, HE L, LI C, et al. Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation[J]. Applied Energy, 2014, 123(12):253-262.
- [12] PENG C, ZOU J, LIAN L, et al. An optimal dispatching strategy for V2G aggregator participating in supplementary frequency regulation considering EV driving demand and aggregator's benefits[J]. Applied Energy, 2017, 190:591-599.
- [13] LIU H, QI J, WANG J, et al. EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016(99):1-1.
- [14] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 集中充电模式下的电动汽车调频策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):69-76.
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Frequency regulation strategy for electric vehicles with centralized charging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9):69-76.
- [15] LIU H, HU Z, SONG Y, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):3110-3119.
- [16] 刘东奇,钟庆昌,王耀南,等. 基于同步逆变器的电动汽车V2G智能充放电控制技术[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):544-556.
LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. Asynchronous-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):544-556.
- [17] CHANG T H, ALIZADEH M, SCAGLIONE A. Real-time power balancing via decentralized coordinated home energy scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3):1490-1504.
- [18] 梁英,盛万兴,钟庆昌,等. 基于同步逆变器的微电网二次调频策略及特性分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):391-402.
LIANG Ying, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Secondary frequency regulation strategies and characteristic analysis of synchronverter-based microgrids[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2017, 37(2): 391-402.
- [19] FAIGL J, KULICH M. An application of the self-organizing map in the non-Euclidean traveling salesman problem [J]. Neurocomputing, 2011, 74(5): 671-679.
- [20] KOHONEN T. Essentials of the self-organizing map [J]. Neural Networks the Official Journal of the International Neural Network Society, 2013, 37(1): 52-65.
- [21] GHASEMINEZHAD M H, KARAMI A. A novel self-organizing map (SOM) neural network for discrete groups of data clustering [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(4): 3771-3778.
- [22] ANDERSON P M. Power system control and stability, 2nd Edition [M]. Iowa, USA: Iowa State University Press, 1977.

作者简介:



陈仲伟

陈仲伟(1984),男,博士,高级工程师,从事智能配电网运行相关工作 (Email: chenzw@hn.sgcc.com.cn);

欧名勇(1965),男,学士,高级工程师,从事电网运行相关工作;

谭玉东(1983),男,博士,高级工程师,从事电网规划与运行相关工作。

Self-organized droop frequency regulation method for EV aggregator

CHEN Zhongwei¹, OU Mingyong¹, TAN Yudong¹, WANG Yichao¹, ZHANG Yun², LIAN Guohai²

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Economic & Technical Research Institute, Changsha 410004, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Under the background of large-scale electric vehicles (EV) integrated into the power grid, in order to coordinate and control the charging and discharging power of EV group, so as to make EV a useful energy storage element which can provide frequency regulation for the power grid, the self-organizing classification method of EV group from the aspect of state-of-charge (SOC) is studied in this paper, and a self-organizing map (SOM) neural network is designed to divide the EV group into several classes in the mathematical space according to the SOC. Based on the clustering results and the SOC level of each EV individuals in different classes, a control method of variable parameter droop frequency regulation for EV charging and discharging control terminal is presented. The simulation results show that by applying the proposed control method, the large-scale EVs integrated into the power grid with different SOC levels will share the peak load and surplus power of the power grid in proportion to their respective capacity, and meet the demand of power grid frequency regulation.

Keywords: self-organizing map; electric vehicle; frequency regulation; droop control; control strategy

(编辑 陈静)