

时滞环境下基于电动汽车与电热泵的协调频率控制

李晓萌, 贾宏杰, 穆云飞, 王明深, 董朝宇, 余晓丹, 王 蕾

(天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:提出一种时滞环境下应用电动汽车和电热泵协同参与系统负荷频率控制的调控策略。在考虑电动汽车和电热泵单体运行特性的基础上,分别构建电动汽车与电热泵集群的调频控制模型;充分考虑负荷频率控制中通信延时的影响,建立包含时滞环节的调频系统动态模型;进一步地,利用该模型对不同类型可控负荷集群对应的时滞稳定裕度进行分析,并根据最大化系统稳定裕度的原则优先采用稳定裕度较大的可控负荷进行调频,从而对电动汽车与电热泵在参与频率调节过程中进行协调控制。

关键词:可再生能源;电动汽车;电热泵;频率控制;时滞

中图分类号:TM 761;U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202002026

0 引言

近年来,作为应对资源枯竭、全球气候变化,降低二氧化碳排放和在能源开发中实施“清洁替代”的重要举措,我国投资建设了大量的可再生能源发电站,如光伏电站、风电场等。我国“十三五”规划中提出,到2020年风电装机将超过 2.1×10^8 kW,太阳能发电装机将超过 1.1×10^8 kW,全部可再生能源发电装机将达 6.8×10^8 kW,发电量将达 1.9×10^8 kW·h,占全部发电量的27%^[1]。目前,大规模间歇性可再生能源的并网发电已带来诸多问题,如影响系统电能质量,造成系统频率波动范围过大,从而难以满足用能需求等^[2-3]。因此,可再生能源并网后的系统频率稳定控制问题亟需解决。

传统的频率控制是在发电侧通过增加发电机的备用容量以解决系统中功率不平衡问题。在新能源接入后,尤其是可再生能源占比较大且波动性极强时,鉴于技术可行性和经济性,发电机组不能在大范围内快速响应。在智能电网中,几类可控负荷,如电动汽车EV(Electric Vehicle)和温控负荷TCL(Thermal Controllable Load)等需求响应资源^[4-6],为解决可再生能源引发的频率问题提供了一种备选方案。基于需求响应技术,通过调节EV的入网状态或者温控负荷的温度可以间接控制负荷消耗的功率,进而达到调频的目的。同时,EV具有功率双向调节能力,而温控负荷具有热惯性、响应速度慢等特点,由

于不同负荷资源所表征的运行特性各不相同,需要在使用中加以考虑和进行协调控制。

各国学者们已针对可控负荷参与系统频率控制开展了大量研究。文献[7]提出了一种考虑用户充电需求的分布式控制方法,EV在满足用户充电目标的同时参与了系统的一次调频。文献[8-9]将温控负荷用一阶惯性环节建模后进行了负荷频率控制的研究,但该模型难以探究可控负荷内部的物理规律,如电热泵HP(Heat Pump)温度的变化等。文献[10]提出了一种包含大量EV和HP单体的二次调频策略,但由于单体HP容量较小,在实际应用中难以直接进行协调。文献[11]研究了在多区域系统中,采用EV参与一次调频时通信延时对调频效果的影响,但没有将其作为指导来制定频率控制策略。然而上述研究均忽略了EV或者HP群体在负荷频率控制过程中的通信延时对调频策略的指导意义。实际上,各类可控负荷集群参与控制的上下通道都存在延时^[12-13],如何根据不同资源延迟特性的差异性,制定有效的协调频率控制策略,是本文关注的主要问题。

为进行负荷频率控制的稳定性分析,本文首先在充分考虑可控负荷入网特性的基础上,分别对EV和HP的单体及其集群进行动态建模;然后,考虑负荷频率控制过程的通信延时,得到包含时滞的系统调频模型,对系统进行时滞稳定性分析,并根据稳定性分析结果提出有效的协调频率控制策略;最后,通过算例验证了所提协调频率控制策略的有效性。

1 系统负荷频率控制模型

本文将调频手段分为发电机调频、EV频率控制、以HP为代表的温控负荷参与频率控制3类,并建立相应模型。

1.1 发电机的系统调频模型

发电机组的调频特性包含一次调频与二次调频,用一台等值发电机模型模拟,如图1所示。一次

收稿日期:2019-09-09;修回日期:2019-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51625702);国家自然科学基金-国家电网公司联合基金资助项目(U1766210);天津市高层次创新团队和天津市重点领域创新团队资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51625702),the Joint Research Fund of the NSFC-SGCC(U1766210) and Tianjin High-level Innovation Team and Tianjin Key Areas Innovation Team

调频中,发电机调速器根据频率偏差自动调节其输出功率;二次调频中,发电机输出功率受系统调度中心控制。其动态过程可表示为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{Y} = -\frac{1}{T_G} \Delta Y - \frac{1}{R_{eq} T_G} \Delta f + \frac{1}{T_G} \Delta P_G^D \\ \Delta \dot{P}_r = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_G} \right) \Delta Y - \frac{1}{T_2} \Delta P_r - \frac{T_1}{T_2 R_{eq} T_G} \Delta f + \frac{T_1}{T_2 T_G} \Delta P_G^D \\ \Delta \dot{P}_m = \frac{1}{T_T} \Delta P_r - \frac{1}{T_T} \Delta P_m \end{cases} \quad (1)$$

其中,状态变量 ΔY 、 ΔP_r 、 ΔP_m 分别为调速器阀门、热输出功率和电功率的增量; R_{eq} 为发电机调频的下垂系数; Δf 为系统频率偏差; ΔP_G^D 为二次调频过程中系统控制中心下发给发电机组的控制信号; T_1 、 T_2 和 T_G 分别为调速器的超前、滞后和执行机构的时间常数; T_T 为等值涡轮机的时间常数。

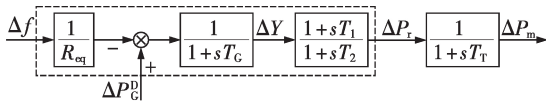


图1 发电机组的调频模型

Fig.1 Frequency regulation model of generator unit

1.2 EV 负荷频率控制

1.2.1 EV 集群一次调频模型

为探究EV集群的频率响应特性,将EV参与调频的形式分为一次调频和二次调频,并构建相应的动态模型。单体EV参与控制的模式为汽车入网V2G(Vehicle to Grid)模式,其充放电系数可表述为关于其荷电状态SOC(State Of Charge)的函数^[7,11]。

当 $SOC_{EV,i} \leq SOC_{EV,i}^{\min}$ 时,有:

$$\begin{cases} K_{EV,i}^{ch} = K_{EV,i}^{\max} \\ K_{EV,i}^{dis} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $K_{EV,i}^{ch}$ 、 $K_{EV,i}^{dis}$ 分别为第 i 辆EV的充电和放电系数,表征其充放电的速率; $K_{EV,i}^{\max}$ 为第 i 辆EV最大的充放电系数,由为EV提供服务的充电桩决定。

当 $SOC_{EV,i} \geq SOC_{EV,i}^{\max}$ 时,有:

$$\begin{cases} K_{EV,i}^{ch} = 0 \\ K_{EV,i}^{dis} = K_{EV,i}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

当 $SOC_{EV,i}^{\min} < SOC_{EV,i} \leq SOC_{EV,i}^s$ 时,有:

$$\begin{cases} K_{EV,i}^{ch} = \frac{1}{2} K_{EV,i}^{\max} \left(1 + \sqrt{\frac{SOC_{EV,i} - SOC_{EV,i}^s}{SOC_{EV,i}^{\min} - SOC_{EV,i}^s}} \right) \\ K_{EV,i}^{dis} = \frac{1}{2} K_{EV,i}^{\max} \left(1 - \sqrt{\frac{SOC_{EV,i} - SOC_{EV,i}^s}{SOC_{EV,i}^{\min} - SOC_{EV,i}^s}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

当 $SOC_{EV,i}^s < SOC_{EV,i} < SOC_{EV,i}^{\max}$ 时,有:

$$\begin{cases} K_{EV,i}^{ch} = \frac{1}{2} K_{EV,i}^{\max} \left(1 - \sqrt{\frac{SOC_{EV,i} - SOC_{EV,i}^s}{SOC_{EV,i}^{\max} - SOC_{EV,i}^s}} \right) \\ K_{EV,i}^{dis} = \frac{1}{2} K_{EV,i}^{\max} \left(1 + \sqrt{\frac{SOC_{EV,i} - SOC_{EV,i}^s}{SOC_{EV,i}^{\max} - SOC_{EV,i}^s}} \right) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $SOC_{EV,i}$ 、 $SOC_{EV,i}^s$ 、 $SOC_{EV,i}^{\max}$ 和 $SOC_{EV,i}^{\min}$ 分别为第 i 辆EV单体的实时SOC、初始SOC、允许的最大SOC和最小SOC值。

基于上述单体模型,在EV集群模型中,设同一集群中EV充、放电的时间常数相同,并记为 T_{EV} 。集群充放电系数 K_{EV} 用集群中单体EV充放电系数的数学期望表示。假设EV的SOC满足一定的分布函数,则:

$$K_{EV}^{ch} = \int_0^1 K_{EV,i}^{ch}(SOC_i) \phi_{SOC} dSOC \quad (6)$$

$$K_{EV}^{dis} = \int_0^1 K_{EV,i}^{dis}(SOC_i) \phi_{SOC} dSOC \quad (7)$$

$$K_{EV} = \begin{cases} K_{EV}^{ch} & \Delta f > 0 \\ 0 & \Delta f = 0 \\ K_{EV}^{dis} & \Delta f < 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, ϕ_{SOC} 为集群中EV的SOC分布函数; $K_{EV,i}^{ch}(SOC_i)$ 和 $K_{EV,i}^{dis}(SOC_i)$ 如式(2)~(5)所示; K_{EV}^{ch} 、 K_{EV}^{dis} 分别为利用单体EV的充放电系数和SOC的分布规律得到的EV集群的充、放电系数。

单体EV的充放电功率见式(9)和式(10)。

充电模式下有:

$$\Delta P_{EV,i}^{-} = -\frac{K_{EV,i}^{ch}}{1 + sT_{EV,i}^{ch}} \Delta f \quad (9)$$

放电模式下有:

$$\Delta P_{EV,i}^{+} = -\frac{K_{EV,i}^{dis}}{1 + sT_{EV,i}^{dis}} \Delta f \quad (10)$$

其中, $\Delta P_{EV,i}^{-}$ 和 $\Delta P_{EV,i}^{+}$ 、 $T_{EV,i}^{ch}$ 和 $T_{EV,i}^{dis}$ 分别为EV集群中第 i 辆EV一次调频的充放电功率、充放电时间常数。

则EV集群的一次调频响应功率 ΔP_{EV}^1 为:

$$\Delta P_{EV}^1 = \sum \Delta P_{EV,i}^1 \quad (11)$$

$$\Delta P_{EV,i}^1 = \begin{cases} \Delta P_{EV,i}^{-} & \Delta f > 0 \\ 0 & \Delta f = 0 \\ \Delta P_{EV,i}^{+} & \Delta f < 0 \end{cases} \quad (12)$$

1.2.2 EV 集群二次调频模型

EV参与系统二次调频的实现形式与传统发电机组类似,当频率偏差越限后由系统控制中心向EV集群下发需要响应的功率控制信号 ΔP_{EV}^D 来实现EV的功率调整。

首先计算EV集群在二次调频过程中的可控功率。图2给出了单体EV接入电网后的功率及储能约束。在接入电网时段 $[t_{EV,i}^s, t_{EV,i}^d]$, EV充电功率受

到其额定充电功率 $P_{EV,i}^{ch}$ 、额定放电功率 $P_{EV,i}^{dis}$ 、SOC 的变化范围 $[SOC_{EV,i}^{min}, SOC_{EV,i}^{max}]$ 、出行 SOC 需求 $SOC_{EV,i}^d$ 的约束^[14]。记图 2(b) 中实线所构成的上边界为 $SOC_{EV,i}^+(t)$ ，虚线所构成的下边界为 $SOC_{EV,i}^-(t)$ ，则单体 EV 充电功率 $P_{EV,i}$ 的上、下限约束分别为：

$$P_{EV,i}^+(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_{EV,i}^s, t \geq t_{EV,i}^d, t_{EV,i}^s < t < t_{EV,i}^d \text{ 且} \\ & SOC_{EV,i}(t) \leq SOC_{EV,i}^-(t) \\ P_{EV,i}^{dis} & t_{EV,i}^s < t < t_{EV,i}^d \text{ 且 } SOC_{EV,i}(t) > SOC_{EV,i}^-(t) \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{EV,i}^-(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_{EV,i}^s, t \geq t_{EV,i}^d, t_{EV,i}^s < t < t_{EV,i}^d \text{ 且} \\ & SOC_{EV,i}(t) \geq SOC_{EV,i}^+(t) \\ P_{EV,i}^{ch} & t_{EV,i}^s < t < t_{EV,i}^d \text{ 且 } SOC_{EV,i}(t) < SOC_{EV,i}^+(t) \end{cases} \quad (14)$$

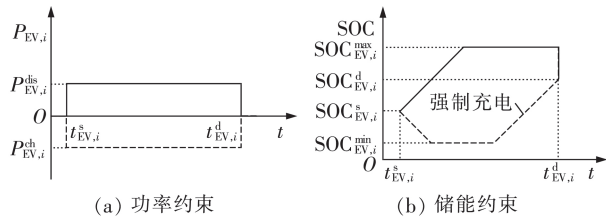


图2 单体EV功率及储能约束

Fig.2 Power and storage limits of single EV

由单体EV的充电边界可得到EV集群的充电功率 P_{EV} 及其边界 (P_{EV}^{max} 和 P_{EV}^{min}) 如下：

$$\begin{cases} P_{EV}(t) = \sum_{i=1}^{n_{EV}} P_{EV,i}(t) \\ P_{EV}^{max}(t) = \sum_{i=1}^{n_{EV}} P_{EV,i}^+(t) \\ P_{EV}^{min}(t) = \sum_{i=1}^{n_{EV}} P_{EV,i}^-(t) \end{cases} \quad (15)$$

则EV集群二次调频的可控功率为满足实际充电功率和一次调频后的可利用功率：

$$\begin{cases} \Delta P_{EV}^+(t) = P_{EV}^{max}(t) - P_{EV}(t) - \Delta P_{EV}^1(t - \Delta t) \\ \Delta P_{EV}^-(t) = P_{EV}^{min}(t) - P_{EV}(t) - \Delta P_{EV}^1(t - \Delta t) \end{cases} \quad (16)$$

在二次调频过程中调度中心下发给EV集群的控制信号也应在式(16)所示的可控功率范围内，即：

$$\Delta P_{EV}^-(t) \leq \Delta P_{EV}^D(t) \leq \Delta P_{EV}^+(t) \quad (17)$$

由上述分析可得EV集群调频模型如图3所示，其动态方程为：

$$\Delta \dot{P}_{EV}^R = -\frac{K_{EV} n_{EV}}{R_{EV} T_{EV}} \Delta f - \frac{1}{T_{EV}} \Delta P_{EV}^R + \frac{1}{T_{EV}} \Delta P_{EV}^D \quad (18)$$

其中，状态变量 ΔP_{EV}^R 为EV集群实际响应功率； R_{EV}



图3 EV集群的负荷频率控制模型

Fig.3 Model of EV aggregator in load frequency control

为EV调频的下垂系数； T_{EV} 为EV集群调控的时间常数； n_{EV} 为集群中EV的数量。

1.3 HP负荷频率控制

1.3.1 HP集群模型

本节将以HP为例，构建温控负荷参与负荷频率控制的集群模型。单体HP的热力学动态模型如下：

$$\begin{cases} \dot{T}_{a,i} = \frac{1}{C_{a,i}} \left[\frac{1}{R_{m,i}} T_{m,i} - \left(\frac{1}{R_{a,i}} + \frac{1}{R_{m,i}} \right) T_{a,i} + Q_{a,i} + \frac{1}{R_{a,i}} T_o \right] \\ \dot{T}_{m,i} = \frac{1}{C_{m,i} R_{m,i}} (T_{a,i} - T_{m,i}) \end{cases} \quad (19)$$

其中， $T_{a,i}$ 、 $T_{m,i}$ 和 T_o 分别为第 i 台 HP 的室内空气温度、室内物质温度和室外温度； $C_{a,i}$ 、 $C_{m,i}$ 分别为第 i 台 HP 的室内空气热容和室内物质热容； $R_{a,i}$ 、 $R_{m,i}$ 分别为室内空气热阻和室内物质热阻； $Q_{a,i}$ 为第 i 台 HP 的操作热比率。 $Q_{a,i}$ 将设备消耗的电功率与温度联系起来，形成HP的热电耦合模型，即：

$$Q_{a,i} = s_i Q_{op,i} = s_i \frac{P_{rated,i}}{\eta_i} \quad (20)$$

其中， $Q_{op,i}$ 、 $P_{rated,i}$ 和 η_i 分别为第 i 台 HP 的额定热比率、额定功率和效率； s_i 为 HP 开关状态。 s_i 由其温度决定，即：

$$s_i(t + \Delta t) = \begin{cases} 1 & T_{a,i}(t + \Delta t) \leq T_{a,i}^{min} \\ 0 & T_{a,i}(t + \Delta t) \geq T_{a,i}^{max} \\ s_i(t) & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

其中， $T_{a,i}^{min} = T_{set,i} - \frac{\delta_i}{2}$ ， $T_{a,i}^{max} = T_{set,i} + \frac{\delta_i}{2}$ ， $T_{set,i}$ 和 δ_i 分别为第 i 台 HP 温度设定值和用户允许的温度变化范围。

综合式(19)–(21)可得HP单体的温度变化及与功率消耗情况存在的电热耦合关系：当HP开启处于加热状态时，消耗功率；当HP关闭时，消耗功率为0。

由以上分析可以看出HP单体动态模型是同时具有连续和离散变量的二阶微分方程。将集群中HP数量记为 n_{HP} ，由此得到HP集群负荷模型维数为 $2n_{HP}$ ，维数巨大。为简化起见，本文假设所有HP运行参数相同^[15]，基于此构建HP负荷集群模型^[16]，其状态方程为：

$$\dot{q}(t) = Fq(t) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} q(t) &= [q_{on}(1, 1, t), q_{on}(1, 2, t), \dots, q_{on}(n_a, n_m, t), \\ & q_{off}(1, 1, t), q_{off}(1, 2, t), \dots, q_{off}(n_a, n_m, t)]^T = \\ & [q_{on}^G(t), q_{off}^G(t)]^T \end{aligned} \quad (23)$$

其中， q 为将HP集群分成不同温度区间而构成的 $2n_a n_m$ 维温度状态向量； $q_{on}(i, j, t)$ 、 $q_{off}(i, j, t)$ 分别为HP在开启、关闭状态下温度 $T_a \in [a_i, a_{i+1}]$ 且 $T_m \in [m_j, m_{j+1}]$ 的状态量； $q_{on}^G(t)$ 、 $q_{off}^G(t)$ 分别为HP在时刻 t

处于开启、关闭的状态向量;状态矩阵 $\mathbf{F} \in \mathbf{R}^{2n_a n_m \times 2n_a n_m}$, 可见集群模型的维数为 $2n_a n_m$, 远小于 n_{HP} , 其仅取决于集群温度区间的数量, 模型维数大幅降低。进而获得低阶、不含离散变量且可反映 HP 温度变化的集群功率模型, 可用来进行稳定性分析。

进一步地, 将 HP 调频的调节过程分为一次调频和二次调频。在一次调频中, 根据频率偏差系数直接调整 HP 集群的状态变量, 其机制与传统机组的一次调频类似, 是 HP 对频率偏差的自动响应, 不受系统频率控制中心的控制。由频率偏差引起的 HP 集群温度状态向量变化量为:

$$q_{\Delta} = \mathbf{K}_{HP} \Delta f \quad (24)$$

$$\mathbf{K}_{HP} = [\mathbf{K}_{HP}^{\text{on}}, \mathbf{K}_{HP}^{\text{off}}]$$

$$\mathbf{K}_{HP}^{\text{on}} = \frac{1}{n_a n_m} \underbrace{[1; 1; \cdots; 1]}_{n_a n_m} \quad (25)$$

$$\mathbf{K}_{HP}^{\text{off}} = \frac{1}{n_a n_m} \underbrace{[-1; -1; \cdots; -1]}_{n_a n_m} \quad (26)$$

其中, $\mathbf{K}_{HP}^{\text{on}}$ 和 $\mathbf{K}_{HP}^{\text{off}}$ 分别为对 q_{on}^G 和 q_{off}^G 的控制向量。当频率升高时, 关闭中的部分 HP 将被开启以增加功率消耗; 当频率降低时, 开启中的部分 HP 将被关闭以减少功率消耗, 从而起到利用 HP 集群调节系统频率的作用。

1.3.2 HP 集群二次调频控制实现

HP 集群参与二次调频的流程见附录 A 中图 A1。该过程主要包括 3 个部分: 采集设备状态、对设备进行分组和分组控制。

首先, 系统控制中心计算出 HP 集群当前可控容量 ΔP_{HP} 为:

$$\Delta P_{HP} = [\Delta P_{HP}^+, \Delta P_{HP}^-] \quad (27)$$

$$\Delta P_{HP}^+ = p_{\text{on}} n_{HP} P_{\text{rate}} \quad (28)$$

$$\Delta P_{HP}^- = p_{\text{off}} n_{HP} P_{\text{rate}} \quad (29)$$

其中, ΔP_{HP}^+ 为 HP 集群的可控功率输出量, 即可额外减小 ΔP_{HP}^+ 大小的功率消耗; ΔP_{HP}^- 为 HP 集群的可控功率输入量, 即可从电网多消耗 ΔP_{HP}^- 大小的功率; p_{on} 和 p_{off} 分别为处于打开和关闭状态的 HP 数量百分数。

然后, 为更精细地设计控制策略, 减少 HP 热惯性对调频的影响, 对 HP 集群实施分组控制, 如图 4 所示。图中, $q_{\text{on/off}}(1, 1)$ 表示 $q_{\text{on}}(1, 1)$ 或者 $q_{\text{off}}(1, 1)$, 其他类似。将 HP 集群根据开关状态分为开启群和关闭群。在 T_a 与 T_m 组成的 2 维平面中, 根据处于相同设备群中的 T_a 不同将 HP 进行分组。可以看出, 在开启和关闭设备群中, 均有 n_a 个设备分组。

最后, 根据响应信号对选定的群体和设备分组进行运行状态的控制: 当需要减少系统 HP 负荷消耗时, 在开启群中按 T_a 由高到低依次关闭 HP; 当

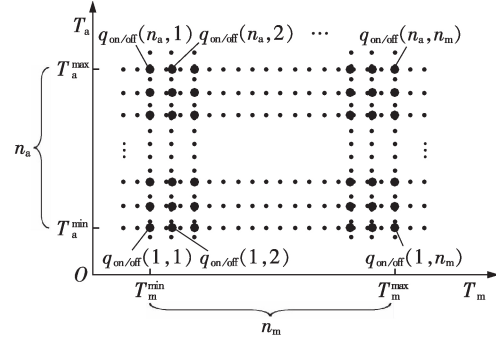


图4 HP 集群分组示意图

Fig.4 Schematic diagram of HP aggregator group

需要增加系统 HP 负荷消耗时, 在关闭群中按 T_a 由低到高分组依次打开 HP。将进行开关状态转换的 HP 占比记为 α , 第 k 组的可控功率输出量和可控功率输入量分别为 $\Delta P_{HP,k}^+$ 和 $\Delta P_{HP,k}^-$, 分组控制中第 k 组的控制矩阵为 $\mathbf{B}^k(\alpha)$, 分以下 2 种情况考虑。

(1) 需要减少 HP 消耗功率 ($\Delta f < \Delta f^L$, $\Delta P_{HP}^D > 0$) 时, 在开启群内按 T_a 由高到低依次关闭部分 HP。采取控制策略如下:

$$\alpha = -\Delta P_{HP}^D / \Delta P_{HP,k}^+ \quad (30)$$

$$\mathbf{B}^k(\alpha) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11}^k & \mathbf{0}_{n_a n_m} \\ \mathbf{B}_{21}^k & \mathbf{I}_{n_a n_m} \end{bmatrix} \quad k = 1, 2, \cdots, n_a \quad (31)$$

a. 对 $T_a \in [a_{n_a}, a_{n_a+1}]$ 的设备 $q_{\text{on}}(n_a, 1), q_{\text{on}}(n_a, 2), \cdots, q_{\text{on}}(n_a, n_m)$ 实施控制时, $k = n_a$, 控制矩阵为:

$$\mathbf{B}_{11}^{n_a} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{(n_a-1)n_m} & \mathbf{0}_{(n_a-1)n_m \times n_m} \\ \mathbf{0}_{n_m \times (n_a-1)n_m} & (1+\alpha)\mathbf{I}_{n_m} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{B}_{21}^{n_a} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(n_a-1)n_m} & \mathbf{0}_{(n_a-1)n_m \times n_m} \\ \mathbf{0}_{n_m \times (n_a-1)n_m} & -\alpha\mathbf{I}_{n_m} \end{bmatrix} \quad (33)$$

b. 对 $T_a \in [a_{n_a-1}, a_{n_a}]$ 的设备 $q_{\text{on}}(n_a-1, 1), q_{\text{on}}(n_a-1, 2), \cdots, q_{\text{on}}(n_a-1, n_m)$ 实施控制时, $k = n_a - 1$, 控制矩阵为:

$$\mathbf{B}_{11}^{n_a-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{(n_a-2)n_m} & \mathbf{0}_{(n_a-2)n_m \times n_m} & \mathbf{0}_{(n_a-2)n_m \times n_m} \\ \mathbf{0}_{n_m \times (n_a-2)n_m} & (1+\alpha)\mathbf{I}_{n_m} & \mathbf{0}_{n_m} \\ \mathbf{0}_{n_m \times (n_a-2)n_m} & \mathbf{0}_{n_m} & \mathbf{I}_{n_m} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{B}_{21}^{n_a-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(n_a-2)n_m} & \mathbf{0}_{(n_a-2)n_m \times n_m} & \mathbf{0}_{(n_a-2)n_m \times n_m} \\ \mathbf{0}_{n_m \times (n_a-2)n_m} & -\alpha\mathbf{I}_{n_m} & \mathbf{0}_{n_m} \\ \mathbf{0}_{n_m \times (n_a-2)n_m} & \mathbf{0}_{n_m} & \mathbf{0}_{n_m} \end{bmatrix} \quad (35)$$

c. 依此类推, 对 $T_a \in [a_1, a_2]$ 的设备 $q_{\text{on}}(1, 1), q_{\text{on}}(1, 2), \cdots, q_{\text{on}}(1, n_m)$ 实施控制时, $k = 1$, 控制矩阵为:

$$\mathbf{B}_{11}^1 = \begin{bmatrix} (1+\alpha)\mathbf{I}_{n_m} & \mathbf{0}_{n_m \times (n_a-1)n_m} \\ \mathbf{0}_{(n_a-1)n_m \times n_m} & \mathbf{I}_{(n_a-1)n_m} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$B_{21}^1 = \begin{bmatrix} -\alpha I_{n_m} & 0_{n_m \times (n_a-1)n_m} \\ 0_{(n_a-1)n_m \times n_m} & 0_{(n_a-1)n_m} \end{bmatrix} \quad (37)$$

(2)需要增加HP消耗功率($\Delta f > \Delta f^U$, $\Delta P_{HP}^D < 0$)时,在关闭群内按 T_a 由低到高依次打开部分HP。采取控制策略如下:

$$\alpha = -\Delta P_{HP}^D / \Delta P_{HP,k}^- \quad (38)$$

$$B^k(\alpha) = \begin{bmatrix} I_{n_a n_m} & B_{12}^k(\alpha) \\ 0_{n_a n_m} & B_{22}^k(\alpha) \end{bmatrix} \quad (39)$$

a. 对 $T_a \in [a_1, a_2]$ 的设备 $q_{off}(1, 1), q_{off}(1, 2), \dots, q_{off}(1, n_m)$ 实施控制时, $k=1$, 控制矩阵为:

$$B_{12}^1 = \begin{bmatrix} \alpha I_{n_m} & 0_{n_m \times (n_a-1)n_m} \\ 0_{(n_a-1)n_m \times n_m} & 0_{(n_a-1)n_m} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$B_{22}^1 = \begin{bmatrix} (1-\alpha)I_{n_m} & 0_{n_m \times (n_a-1)n_m} \\ 0_{(n_a-1)n_m \times n_m} & I_{(n_a-1)n_m} \end{bmatrix} \quad (41)$$

b. 对 $T_a \in [a_2, a_3]$ 的设备 $q_{off}(2, 1), q_{off}(2, 2), \dots, q_{off}(2, n_m)$ 实施控制时, $k=2$, 控制矩阵为:

$$B_{11}^2 = \begin{bmatrix} 0_{n_m} & 0_{n_m} & 0_{n_m \times (n_a-2)n_m} \\ 0_{n_m} & \alpha I_{n_m} & 0_{n_m \times (n_a-2)n_m} \\ 0_{(n_a-2)n_m \times n_m} & 0_{(n_a-2)n_m \times n_m} & 0_{(n_a-2)n_m} \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$B_{22}^2 = \begin{bmatrix} I_{n_m} & 0_{n_m} & 0_{n_m \times (n_a-2)n_m} \\ 0_{n_m} & (1-\alpha)I_{n_m} & 0_{n_m \times (n_a-2)n_m} \\ 0_{(n_a-2)n_m \times n_m} & 0_{(n_a-2)n_m \times n_m} & I_{(n_a-2)n_m} \end{bmatrix} \quad (43)$$

c. 依此类推, 对 $T_a \in [a_{n_a}, a_{n_a+1}]$ 的设备 $q_{off}(n_a, 2), q_{off}(n_a, 2), \dots, q_{off}(n_a, n_m)$ 实施控制时, $k=n_a$, 控制矩阵为:

$$B_{12}^{n_a} = \begin{bmatrix} 0_{(n_a-1)n_m} & 0_{(n_a-1)n_m \times n_m} \\ 0_{n_m \times (n_a-1)n_m} & \alpha I_{n_m} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$B_{22}^{n_a} = \begin{bmatrix} I_{(n_a-1)n_m} & 0_{(n_a-1)n_m \times n_m} \\ 0_{n_m \times (n_a-1)n_m} & (1-\alpha)I_{n_m} \end{bmatrix} \quad (45)$$

其中, $\Delta f^U, \Delta f^L$ 分别为系统允许的频率偏差上、下限。

分组控制后HP集群模型的状态方程为:

$$q_c^k = B^k(\alpha)q \quad (46)$$

由上述分析可得HP集群调频模型如图5所示, 其总功率响应为:

$$\Delta P_{HP}^R = n_{HP} P_{rate} C q_c^k - P_{HP}^0 \quad (47)$$

其中, $C = [1, \dots, 1, 0, \dots, 0]$; P_{HP}^0 为HP集群初始功率值。

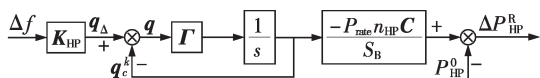


图5 HP集群的负荷频率控制模型

Fig.5 Model of HP aggregator in load frequency control

2 系统时滞影响分析及协调频率控制策略

本节将利用可控负荷(EV和HP)及发电机组的响应能力来调节系统频率:在响应系统控制信号时,分析信号时滞对控制过程的影响。在此基础上,进一步协调EV和HP这2个集群的响应量。

2.1 电力系统时滞稳定性分析

本文提出的发电机组、EV集群与HP集群参与的频率控制模型如图6所示。

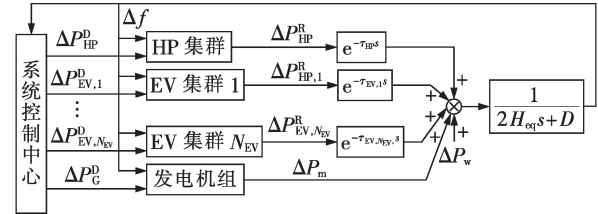


图6 电力系统负荷频率控制模型

Fig.6 Model of power system in load frequency control

当系统不平衡功率 ΔP_T 导致频率产生偏差后,可控负荷和发电机组需及时跟随系统中的不平衡功率进行响应。可控负荷集群的可用功率被采集并传输到系统控制中心,再由控制中心采取相应的控制策略,计算出控制量下传给各可控负荷集群,该过程不可避免地会产生延迟,最终导致EV集群的响应速率和HP集群采集的温度变量存在延时 τ_{EV} 和 τ_{HP} 。由于地理分布和通信延时不同,可将EV拓展为多个集群进行调频。考虑时滞后系统负荷频率控制后的系统频率偏差为:

$$\Delta \dot{f}(t) = \frac{1}{2H_{eq}} \left[\Delta P_m + \sum_{j=1}^{N_{EV}} \Delta P_{EV,j}^R(t - \tau_{EV,j}) \right] - \frac{D}{2H_{eq}} \Delta f - \frac{n_{HP} P_{rate} C}{2H_{eq}} q(t - \tau_{HP}) + \frac{1}{2H_{eq}} \Delta P_w - \frac{1}{2H_{eq}} P_{HP}^0 \quad (48)$$

其中, $j=1, 2, \dots, N_{EV}$, 为不同的EV集群, N_{EV} 为集群数量; D 和 H_{eq} 分别为电力系统阻尼系数和惯性时间常数。

由于延时可能使系统发生小扰动失稳^[17],因此在制定可控负荷的协调频率控制策略时,需考虑不同负荷集群的时滞稳定性。将可控负荷集群对应的使系统保持稳定时的最大时滞记为稳定裕度 τ^* 。

进行时滞稳定性分析的系统动态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t - \tau_{HP}) + \sum_{j=1}^{N_{EV}} A_{j+1} x(t - \tau_{EV,j}) + Bu(t) \\ x(\xi) = h(\xi) \quad \xi \in [-\tau_m, 0] \end{cases} \quad (49)$$

其中, $x(t) = [\Delta Y, \Delta P_r, \Delta P_m, \Delta f, q, \Delta P_{EV,1}^R, \dots, \Delta P_{EV,N_{EV}}^R]^T \in \mathbb{R}^n$, $n = 4 + 2n_a n_m + N_{EV}$; $u(t) = [\Delta P_G^D, \Delta P_w, P_{HP}^0, \Delta P_{EV,2}^D, \dots, \Delta P_{EV,N_{EV}}^D]^T$; $\tau_m = \max(\tau_{HP}, \tau_{EV,1}, \dots, \tau_{EV,N_{EV}})$; h 为系统状

态向量在 $[-\tau_m, 0]$ 内的历史轨迹;状态矩阵 A_0, A_1, A_2, B 见附录B。在 $\tau = [\tau_{HP}, \tau_{EV,1}, \tau_{EV,2}, \dots, \tau_{EV,N_{EV}}]$ 构成的 $N(N=N_{EV}+1)$ 维时滞空间中,设某一方向上的时滞为 $h=[h_1, h_2, \dots, h_N]$,即 $h_l = \tau_l/\tau$,其中 $l=1, 2, \dots, N_{EV}+1, \tau = \|\tau\|$ 。系统时滞稳定裕度的计算方法详见文献[18]或附录C,此处不再赘述。

2.2 协调频率控制策略

图7具体给出了本文的协调频率控制策略流程及框架。在系统层面,当系统风电功率出现波动导致频率偏差时,系统将计算当前可控负荷的可控容量进而对其实施控制。当系统中存在多种可控负荷时,制定协调频率控制策略的关键在于确定功率分配方式。

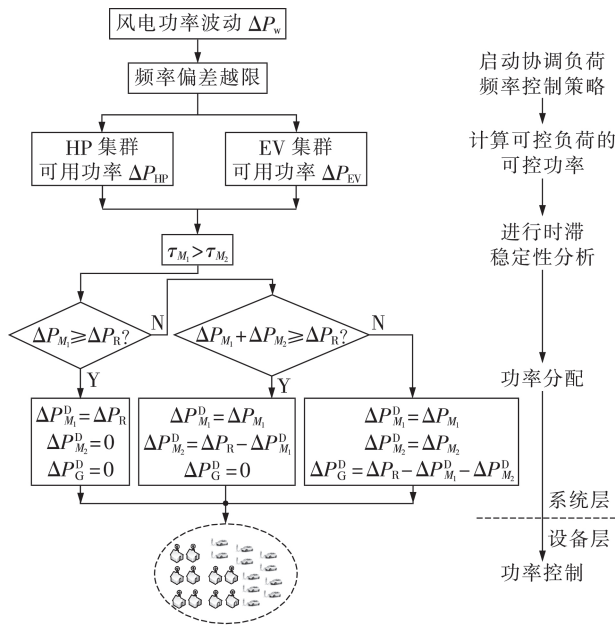


图7 协调负荷频率控制策略流程图及架构

Fig.7 Flowchart and architecture of coordinated load frequency control strategy

本文在确定功率分配方式时,采用2.1节分析方法,考虑控制回路时滞对调频的影响。为扩大在调频过程中系统的稳定裕度,减小延时在调节过程中的影响,同时最大限度地利用可用负荷的调频能力,在选择可控负荷时优先使用稳定裕度较大者 M_1 (τ_{M_1} 表示EV与HP集群中时滞裕度较大者,并记时滞裕度较小者为 τ_{M_2}),对其实施 $\Delta P_{M_1}^D$ 的控制信号。当该可控负荷集群容量不足以补偿不平衡功率时,再利用稳定裕度小的可控负荷的可控容量,对其实施 $\Delta P_{M_2}^D$ 的控制信号,若所有可控负荷的可控容量之和仍不能补偿不平衡功率($\Delta P_{M_1} + \Delta P_{M_2} < \Delta P_R$)时,采用发电机调频,实施 ΔP_G^D 的控制信号。

在设备层面,采用1.1—1.3节控制方式对发电机、EV和HP进行功率或开关状态的调整。

3 仿真分析

算例采用的系统和可控负荷参数见附录D中表D1—D3^[19],设定系统允许的频率偏差波动范围为 ± 0.1 Hz以内。

3.1 时滞对负荷频率控制的影响

图8给出了1 h内高比例风电的功率波动。图中风电功率波动为标幺值。当 $\tau_{EV} = \tau_{HP} = \tau$ 时,系统的调频效果如图9所示。可以看出响应的延迟会使频率波动增大,且时滞越大,频率波动越大。这是由于时滞的增大加剧了系统有功功率的不平衡。因此,合理考虑时滞环节对频率调节有重要意义。

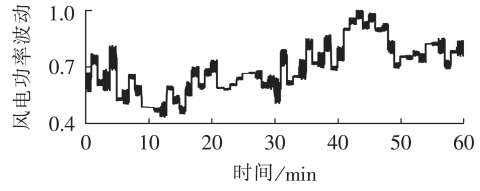


图8 系统风电功率波动

Fig.8 Variation of wind power

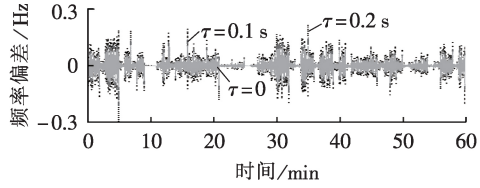


图9 通信延时对调频系统的影响

Fig.9 Influence of time-delay on frequency control system

3.2 考虑时滞影响的频率响应对象优选

本节将分析各负荷集群在频率调节时的稳定裕度,并基于此来优选参与频率调节的对象。

图10给出了不同可控负荷集群使系统保持稳定的时滞稳定裕度。可以看出,当EV与HP集群同时参与负荷频率控制时,EV的稳定裕度约为300 ms,远远小于HP集群能允许的稳定裕度(>10 s)。造成这种现象的原因是:由于HP集群的功率变化取决于其设备开关状态,只要温度在一定区间范围内,其设备开关状态将保持不变;要使HP状态改变,需达到温度的上下边界;由于HP的热惯性,导致在一定时间内其功率变化量很小,因此当HP集群的温度采集

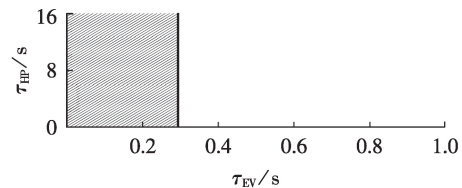


图10 调频系统的时滞稳定裕度

Fig.10 Time-delay stable margin of frequency regulation system

过程出现延时后,其功率响应变化很小,即对时滞的敏感程度低。在稳定裕度方面则表现为HP集群所在的竖直方向上的稳定裕度大幅延伸,即HP集群比EV集群能够承受更大的时滞。基于上述分析,在制定协调频率控制策略时,将优先采用HP负荷调频。

3.3 对协调频率控制策略的分析

图11给出了实施协调频率控制后的系统频率偏差。可以看出采用EV和HP的协调频率控制策略后,大幅减小了系统频率偏差,使其均在 ± 0.1 Hz以内,调频效果显著。

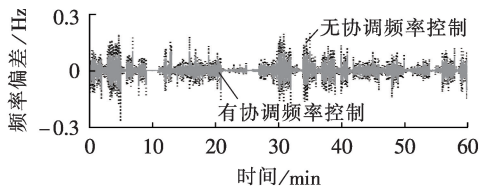


图11 系统频率偏差

Fig.11 Deviation of system frequency

图12为EV集群在协调控制策略中的功率特性。图中EV集群功率为标么值。单体EV模型在计算可控能力时,考虑了入网时段、出行需求的影响,保证了单体及集群可控容量边界计算的精确度。从图中可以看出,EV集群的功率响应 ΔP_{EV}^R 是在一次调频响应 ΔP_{EV}^I 的基础上施加二次调频 ΔP_{EV}^D 后的总响应功率。由于可控容量充足,三者均在可控容量范围 $[\Delta P_{EV}^{ch}, \Delta P_{EV}^{dis}]$ 内,总响应功率在某一时刻的最大可能值为该时刻EV集群的可控容量。同时可以看出,EV并不会长时间处于放电状态,因此不会对EV集群可控容量边界造成较大影响。

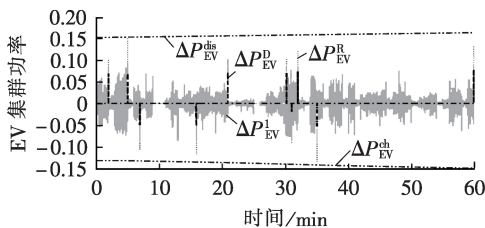


图12 协调频率控制中EV集群的功率特性

Fig.12 Power characteristic of EV aggregator in coordinated frequency control

图13给出了协调控制策略中HP集群的功率特性。图中HP集群功率为标么值。设HP集群初始温度在温度平面内平均分布,则初始可控功率输出量和可控功率输入量均为0.03 p.u.。在协调频率控制过程中,由于其只能由电网单向供电,所以HP集群的实时消耗功率始终为负,如实线所示。HP集群可控容量为实时消耗功率与最大消耗功率(0.2 p.u.)和最小消耗功率(0)之间的功率差值。当系统频率超过限值时,二次调频启动,如虚线所示,数值为正时

表示需要减小HP功率,数值为负时表示需要增加HP功率。

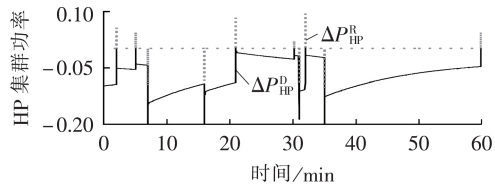


图13 协调频率控制中HP集群的功率特性

Fig.13 Power characteristic of HP aggregator in coordinated frequency control

HP集群在协调频率控制过程中的温度状态变量见附录E中图E1。可以看出对HP进行分组控制使其保证了一定的可控容量,即在调频过程中均有一定的处于打开或关闭状态的设备,这是由于分组控制实际上是对HP集群可控功率进行分组,可以避免在调频过程中全部打开或全部关闭设备,减轻其热惯性对调频的影响。

3.4 协调负荷频率控制策略对系统小扰动稳定性的改善

本节采用时域法对负荷频率控制系统的时滞小扰动稳定进行分析。考虑EV与HP的通信均存在0.279 s的延时,图14给出了2种控制策略下的系统频率曲线(仿真中 $\Delta P_w = 0.05$ p.u.)。图中的比例分配型控制策略^[20]指根据2种集群的可用容量按比例对二次调频的控制信号同时进行分配。可以看出,虽然算例所选时滞在图10所示的稳定域中(靠近稳定边界),但当系统存在扰动后,如果控制措施采取不当可能导致系统小扰动失稳。如采用比例分配型策略使频率响应呈振荡发散,系统为不稳定状态,而本文提出的协调频率控制策略可以保持系统的时滞稳定性。与比例分配型策略相比,本文提出的协调频率控制策略优先控制对时滞敏感度低的HP集群,避免控制对时滞敏感的EV集群。因此,在含可再生能源系统中,出现较大通信延时下的稳定性要优于比例型策略,从而增强了系统的小扰动稳定性。

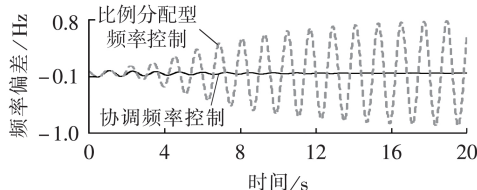


图14 2种频率控制策略的时滞稳定性

Fig.14 Time-delayed stability of two frequency control strategies

4 结论

本文研究了利用EV和HP改善高渗透率可再生能源接入大电网中的系统调频问题。考虑了可控负

荷EV和HP的功率特性,构建了相应单体和集群的调频模型,模型中考虑了通信延时,并对其进行时滞稳定性分析,提出了一种在时滞环境下基于EV和HP的协调频率控制策略。

所提协调频率控制策略主要包括3个方面:提出HP分组控制策略;根据时滞稳定裕度确定EV和HP集群的控制优先级,即HP集群拥有较大的保持系统时滞稳定的稳定裕度,优先选用HP集群的可用功率进行二次调频;根据以上2点制定控制策略,对不平衡功率在EV、HP集群和发电机组之间进行功率分配。算例结果表明,在时滞环境下基于EV和HP集群提出的协调频率控制策略,不但能够减小系统频率波动,而且在一定程度上可以提高系统的时滞小扰动稳定性。

本文利用不同类型的可控负荷集群间通信延时作为制定协调频率控制策略的依据,而未考虑相同类型的集群中延时差异和持续风电波动引起的系统低频振荡问题。因此下一步研究工作将考虑几个不同EV和HP集群中的延时差异,以及针对不同时间尺度特性在低频振荡问题层面制定相应的控制策略。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家发展与改革委员会. 可再生能源发展“十三五”规划[EB/OL]. (2017-06-14)[2019-01-26]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzlgzh/gjzjxgh/201706/t20170614_1196797.html.
- [2] 刘健,于壮,牛东晓,等. 新能源环境替代效用与传输价值研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):69-74.
LIU Jian, YU Zhuangzhuang, NIU Dongxiao, et al. Research on environmental substitution utility and transmission value of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):69-74.
- [3] 潘伟,李勇,曹一家,等. 用于大规模集中式风电并网的VSC-HVDC频率控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):94-99.
PAN Wei, LI Yong, CAO Yijia, et al. Frequency control of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale centralized wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5):94-99.
- [4] 张谦,李晨,周林,等. 计及电动汽车实时可控能量动态变化的负荷频率控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):234-241.
ZHANG Qian, LI Chen, ZHOU Lin, et al. Load frequency control considering dynamic change of real-time controllable EV energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):234-241.
- [5] 王明深,穆云飞,贾宏杰,等. 考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):211-219.
WANG Mingshen, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Smoothing control strategy considering energy storage capability of electric vehicle aggregators and wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5):211-219.
- [6] 戚野白,王丹,贾宏杰,等. 基于需求响应的集群温控负荷建模及参与低频减载策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3):751-759.
- [7] QI Yebai, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on under frequency load shedding strategy using aggregated thermostatically controlled loads based on demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3):751-759.
- [8] LIU H, HU Z C, SONG Y H, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):3480-3489.
- [9] ZHU Q, JIANG L, YAO W, et al. Robust load frequency control with dynamic demand response for deregulated power systems considering communication delays[J]. Electric Machine & Power Systems, 2016, 45(1):75-87.
- [10] ZHU Q, YAO W, JIANG L, et al. Load frequency control with dynamic demand control for deregulated power system[C]// Proceedings of 2014 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Washington DC, USA: IEEE, 2014, 1-5.
- [11] MASUTA T, YOKOYAMA A. Supplementary load frequency control by use of a number of both electric vehicles and heat pump water heaters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1253-1262.
- [12] FAN H, JIANG L, ZHANG C K, et al. Frequency regulation of multi-area power systems with plug-in electric vehicles considering communication delays[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14):3481-3491.
- [13] ZHANG C K, JIANG L, WU H Q, et al. Delay-dependent robust load frequency control for time delay power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2192-2201.
- [14] 张荣祥. 计及用户舒适度的空调负荷参与电力系统频率控制研究[D]. 济南:山东大学,2016.
ZHANG Rongxiang. Active participation of air conditioners in power system frequency control considering users' thermal comfort[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [15] 王明深,丁汀,穆云飞,等. 考虑用户参与度的电动汽车能效电厂模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):207-219.
WANG Mingshen, YU Ting, MU Yunfei, et al. Model of EEPF considering participation factor of EV users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11):207-219.
- [16] 范孟华,王丹,张家安,等. 电热泵负荷等值热力学建模及控制策略评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(4):31-37.
FAN Menghua, WANG Dan, ZHANG Jia'an, et al. Modeling method and control strategy evaluation for electric heat pump[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(4):31-37.
- [17] ZHANG W, LIAN J M, CHANG C Y, et al. Aggregated modeling and control of air conditioning loads for demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):4655-4664.
- [18] 贾宏杰,陈建华,余晓丹. 时滞环节对电力系统小扰动稳定性的影响[J]. 电力系统自动化,2006,30(5):5-8,17.
JIA Hongjie, CHEN Jianhua, YU Xiaodan. Impact of time delay on power system small signal stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5):5-8, 17.
- [19] 贾宏杰,姜涛,姜懿郎,等. 电力系统时滞稳定域临界点的快速搜索新方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):30-36.
JIA Hongjie, JIANG Tao, JIANG Yilang, et al. A method to search critical points of time-delay stability region in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6):30-36.
- [20] JIA H J, LI X M, MU Y F, et al. Coordinated control for EV aggregators and power plants in frequency regulation considering time-varying delays[J]. Applied Energy, 2018, 210: (下转第110页 continued on page 110)

Stackelberg game and greedy strategy based optimal dispatch of active distribution network with electric vehicles

ZHANG Xiao, LI Ran, MA Tao, HUI Xu, LIU Yingpei

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: With increasing penetrations of electric vehicles, both the grid-side impact and cost of disorderly charging and discharging should be taken into account, which contributes to achieving a win-win situation between the power grid and electric vehicle owners. Hence, a Stackelberg game model between the active distribution network and electric vehicle owners is established. The upper layer aims at minimizing the operating cost of the distribution network, and guides the charging and discharging of electric vehicles through reasonable electricity price and incentive strategy. At the same time, the dispatch of distributed generators and energy storages are coordinated. The lower layer performs a two-stage dispatch based on greedy strategy. Firstly, the charging and discharging strategy is optimized with the goal of minimizing cost under the time-of-use electricity price. Then, without reducing the revenue, the strategy is adjusted to maximize the grid's incentive revenue for reducing load fluctuations. Numerical results of a modified IEEE 33-bus system indicate that the proposed model greatly reduces the peak-to-valley difference while maximizing the revenue of both parties. In addition, the new demand peaks caused by charging of a large number of electric vehicles are avoided.

Key words: active distribution network; electric vehicles; Stackelberg game; greedy strategy; two-stage optimization; peak-to-valley difference

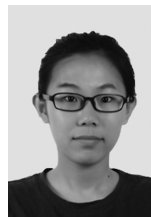
(上接第95页 continued from page 95)

1363-1376.

[20] USLU U, ZHANG B, PILLAI J R, et al. Participation of flexible loads in load frequency control to support high wind penetration[C]//2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Melbourne, Australia: IEEE, 2016: 442-447.

作者简介:

李晓萌(1990—),女,天津人,博士,主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制(E-mail: eexmli@163.com);



李晓萌

贾宏杰(1973—),男,河北石家庄人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定性分析、电网规划、综合能源集成等(E-mail: hjjia@tju.edu.cn);

穆云飞(1984—),男,河北石家庄人,教授,博士,主要研究方向为电力系统安全性及新能源应用等(E-mail: yunfeimu@tju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Coordinated frequency control based on electric vehicles and heat pumps considering time-delay

LI Xiaomeng, JIA Hongjie, MU Yunfei, WANG Mingshen, DONG Chaoyu, YU Xiaodan, WANG Lei

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A coordinated frequency control strategy under time-delay circumstance is presented, in which EVs (Electric Vehicles) and HPs (Heat Pumps) are coordinated as two types of demand response resources. The individual and aggregative models of EV and HP are established, and their operational characteristics are considered. Then, a dynamic frequency regulation model including time-delay loops is built. Furthermore, this model is utilized to analyze the time-delay stability margin of controllable aggregated demands, and the control priority of EVs and HPs that participate in the frequency control is determined by their time-delay stability margins based on the stability margin-maximum criterion.

Key words: renewable energy; electric vehicles; heat pumps; frequency control; time-delay

附录 附录 A

HP 集群参与二次调频的流程如图 A1 所示。

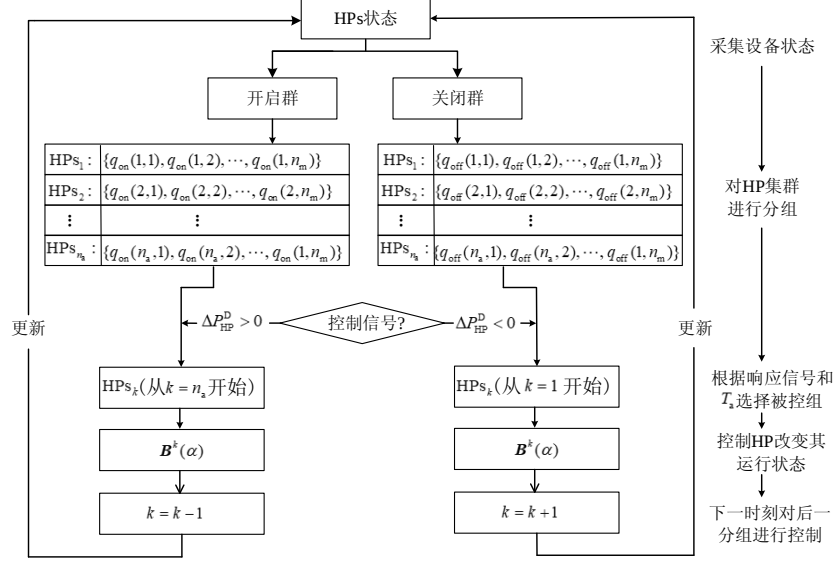


图 A1 HP 集群参与二次调频分组控制过程

Fig.A1 Group controlling structure of aggregated heat pumps in the secondary frequency control

附录 B

系统（式(49)）的状态矩阵 A_0 — A_2 和 B 分别为：

$$(1) \quad A_0 = \begin{bmatrix} A_0^{11} & A_0^{12} & A_0^{13} \\ A_0^{21} & A_0^{22} & A_0^{23} \\ A_0^{31} & A_0^{32} & A_0^{33} \end{bmatrix}$$

$$\text{式中：} \quad A_0^{11} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_G} & 0 & 0 & -\frac{1}{R \frac{T_e}{T_1}} \\ \frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_G T_2} & -\frac{1}{T_2} & 0 & -\frac{T_1}{R_{eq} T_G T_2} \\ 0 & \frac{1}{T_T} & -\frac{1}{T_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2H_{eq}} & \frac{-D}{2H_{eq}} \end{bmatrix}, \quad A_0^{12} = 0_{4 \times 2n_a n_m}, \quad A_0^{13} = 0_{4 \times n_{EV}};$$

$$A_0^{21} = [0_{2n_a n_m \times 3}, \Gamma K_{HP}], \quad A_0^{22} = \Gamma, \quad A_0^{23} = 0_{2n_a n_m \times n_{EV}}; \quad A_0^{32} = 0_{n_{EV} \times 2n_a n_m}, \quad A_0^{31} = \begin{bmatrix} 0_{n_{EV} \times 3}, -\frac{K_{EV} n_{EV}}{R_{EV} T_{EV}} I_{n_{EV} \times 1} \end{bmatrix},$$

$$A_0^{33} = \text{diag}\{-\frac{1}{T_{EV}}, -\frac{1}{T_{EV}}, \dots, -\frac{1}{T_{EV}}\}_{n_{EV} \times n_{EV}}.$$

$$(2) \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0_{3 \times (4+2n_a n_m + n_{EV})} \\ \tilde{A}_1 \\ 0_{(2n_a n_m + n_{EV}) \times (4+2n_a n_m + n_{EV})} \end{bmatrix}$$

$$\text{式中：} \quad \tilde{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{P_{rate} n_{HP}}{2H_{eq} S_B} C & 0_{1 \times n_{EV}} \end{bmatrix}.$$

$$(3) \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0_{3 \times (4+2n_a n_m + n_{EV})} \\ \tilde{A}_2 \\ 0_{(2n_a n_m + n_{EV}) \times (4+2n_a n_m + n_{EV})} \end{bmatrix}$$

$$\text{式中：} \quad \tilde{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times 2n_a n_m} & \frac{1}{2H_{eq}} I_{1 \times n_{EV}} \end{bmatrix}.$$

$$(4) \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}}_1 \\ \tilde{\mathbf{B}}_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{式中: } \tilde{\mathbf{B}}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_G} & 0 & 0 & 0_{1 \times n_{EV}} \\ \frac{T_1}{T_G T_2} & 0 & 0 & 0_{1 \times n_{EV}} \\ 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times n_{EV}} \\ 0 & \frac{1}{2H_{eq}} & -\frac{1}{2H_{eq}} & 0_{1 \times n_{EV}} \\ 0 & 0 & 0 & 0_{1 \times n_{EV}} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}}_2 = \begin{bmatrix} 0_{n_{EV} \times 3} & \text{diag}\{1/T_{EV}, 1/T_{EV}, \dots, 1/T_{EV}\}_{n_{EV} \times n_{EV}} \end{bmatrix}。$$

附录 C

记系统（式(49)）在平衡点处的全部特征值及其实部为：

$$\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] \quad (C1)$$

$$\text{Re } \boldsymbol{\lambda} = [\text{Re } \lambda_1, \text{Re } \lambda_2, \dots, \text{Re } \lambda_n] \quad (C2)$$

则可根据复特征根实部的符号判定系统是否稳定。

$$\begin{cases} \max(\text{Re } \boldsymbol{\lambda}) < 0 & \text{系统小扰动稳定} \\ \max(\text{Re } \boldsymbol{\lambda}) > 0 & \text{系统小扰动不稳定} \\ \max(\text{Re } \boldsymbol{\lambda}) = 0 & \text{系统小扰动临界稳定} \end{cases} \quad (C3)$$

设系统临界稳定时特征根为一对共轭虚根 $\lambda^* = \pm j\beta^*$ ，则有：

$$\lambda^* = \pm j\beta^* \in \text{eig}(\mathbf{A}_0 + \sum_{i=1}^N e^{-j\beta^* \tau_i} \mathbf{A}_i) \quad (C4)$$

其中， eig 表示求取特征值。由上式可以看出， β^* 与 τ_i 相乘，使求解非常困难。因此，引入中间变量 $\xi_i = \beta^* \tau_i$ 来减少变量个数，将上式简化为：

$$\lambda^* = \pm j\beta^* \in \text{eig}(\mathbf{A}_0 + \sum_{i=1}^N e^{-j\xi_i} \mathbf{A}_i) \quad (C5)$$

进而可以先求解中间变量 ξ_i 的临界值，再代入式(C4)求解对应的临界特征值 β^* ，则对应的时滞稳定裕度可以由下式得到：

$$\tau_i^* = \xi_i / \beta^* \quad i=1, 2, \dots, N \quad (C6)$$

附录 D

表 D1 英国电网模型参数取值

Table D1 Parameters of system

参数	R_{eq} (p.u.)	T_G (s)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_r (s)	H_{eq} (s)	D (p.u.)	S_B (GW)
取值	0.09	0.2	2	12	0.3	4.44	1	30

表 D2 EV 集群参数取值

Table D2 Parameters of EV aggregator

参数	取值	参数	取值
ϕ_{SOC}	$N(0.01, 0.6)$	$SOC_{EV,j}^s$	0.6
$P_{EV,j}^{ch}$ (kW)	-7	R_{EV} (p.u.)	0.045
$P_{EV,j}^{dis}$ (kW)	7	T_{EV} (s)	0.035
$SOC_{EV,j}^{min}$	0.2	K_{EV} (p.u.)	4×10^{-6}
$SOC_{EV,j}^{max}$	0.9	n_{EV} (万)	50

表 D3 HP 集群参数取值

Table D3 Parameters of HP aggregator

参数	取值	参数	取值
P_{rate} (kW)	6	δ (°C)	2
n_{HP} (万)	100	n_b	3
T_o (°C)	10	n_m	3
T_{set} (°C)	20	-	-

附录 E

HP 集群在协调频率控制过程中的温度状态变量如图 E1 所示。

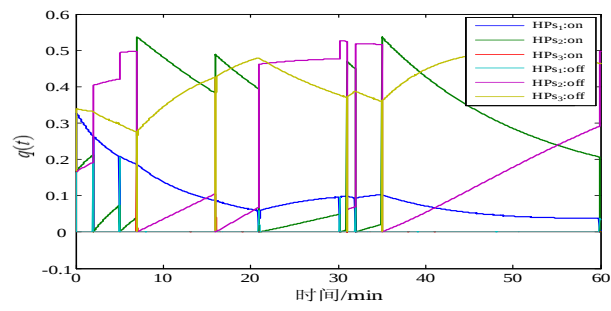


图 E1 协调频率控制中 HP 集群的状态变量

Fig.E1 State variables of HP aggregator in coordinated load frequency control