计及电动汽车辅助调频的负荷频率控制联合优化

杨健维,董鸿志,廖 凯,蔡亮成
(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:当电动汽车利用车网互动(V2G)技术参与电网一次调频时,其下垂控制特性会影响原负荷频率控制的调频性能。基于此,提出了一种计及电动汽车辅助调频的负荷频率控制联合优化方法。建立了含电动汽车的多区域多机组系统的负荷频率控制模型;在此基础上,针对电动汽车电池特性及二次调频出力的有效工作范围,考虑系统内机组的特性等,以时间乘以误差绝对值积分(ITAE)为目标函数,建立了电动汽车辅助调频与传统机组二次调频的联合优化模型,并利用粒子群优化算法进行求解。在MATLAB/Simulink中针对阶跃负荷扰动及长时间随机负荷扰动的情况,对联合优化前、后系统的动态响应进行了对比分析。仿真结果表明:所提联合优化方法能有效地改善负荷频率控制的稳态响应速度、优化系统的调频性能,并且能够保证用户对电动汽车的用电需求。

关键词:电动汽车;V2G;负荷频率控制;辅助调频;下垂控制;联合优化
中图分类号:TM 761;U 469.72 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.032

0 引言

近年来,为了降低对化石能源的依赖,电动汽车EV(Electric Vehicle)的应用得到广泛的普及。作为电力系统的新型负荷,EV既可以作为可控负荷也可作为分布式电源[1],大规模的EV接入电网必定会给电网的稳定性带来一定的影响。车网互动V2G(Vehicle-to-Grid)技术[2]可实现EV与电网之间的信息和能量互动,为EV参与电网辅助服务、优化电网运行提供可能[3]。

据统计,家用EV平均日行驶时间仅为1 h左右[4],这使得EV具备为电网提供服务的基本条件。加之EV的自身特性,使得其在参与辅助电网调频时具有对负荷波动响应迅速和接入点为负荷密集区等优势。因此,若EV的数量充足,且车主愿服从电网调度,便可利用其辅助电网调频。这种辅助电网调频的模式已被证实是可行、有效的[5]。

目前关于EV辅助电网调频策略的研究已十分成熟。文献[6]采用集中管理策略解决了EV分散接入电网而难以统一管理的难题。文献[7]利用上述策略,并根据用户满意度及电池寿命评估了EV可调度容量,利用此可调度容量参与电网调频,进而验证V2G辅助电网调频的有效性。文献[8]建立了EV充放电静态频率特性模型,实现了对EV充放电的协调控制,使其在可控负荷与分布式电源间能够快速有效地切换。对于EV入网的一次调频策略,文献[9]利用椭圆函数对EV荷电状态SOC(State Of Charge)与下垂控制的联系进行描述,并提出在维持电池容量的前提下进行频率下垂控制,实现了V2G技术辅助电网调频。文献[10]通过分析EV的行驶规律,建立实时可控能量动态变化的负荷频率控制模型,研究了不同类型的EV对系统调频的影响。

然而,上述研究主要侧重于验证EV辅助电网调频的有效性和建立EV参与电网调频的控制策略,对V2G模式下EV的下垂控制及系统二次调频的协调控制研究甚少。由于电力系统中引入V2G技术参与一次调频,与系统中原有的负荷频率控制单元共同作用,两者存在相互影响。此时,两者控制参数的协调对系统频率的动态响应特性具有显著的影响[3-5]。因此,为了达到抑制频率波动的最佳效果,充分利用EV与电网的能量交互功能,对二者的协调控制显得尤为重要。

基于此,本文首先建立含EV的多区域互联系统模型,然后综合考虑V2G模式下EV的下垂控制及系统二次调频控制特性,以时间乘以误差绝对值积分ITAE(Integral Time Absolute Error)为目标函数,结合各控制单元的有效工作范围为约束条件建立了优化模型,采用粒子群优化算法对其进行联合优化,并与文献[8]中的频率响应特性及联络线功率波动进行了对比分析。考虑负荷频率控制中调速器死区、EV调频死区,针对多机组在线的情况,基于阶跃负荷扰动的情景对本文所提联合优化方法的有效性进行验证;基于上述仿真结果,在长时间随机负荷扰动的情况下,进一步验证了联合优化方法的有效性,同时可利用EV的SOC维持策略满足车主的用电需求。

收稿日期:2018-08-08;**修回日期**:2018-12-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1766208,61603311);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018GF04);中央高校创新基金资助项目(2682017CX042)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1766208,61603311),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018GF04) and the Innovation Fund of Central Universities(2682017CX042)

1　EV 辅助调频的负荷频率控制模型

1.1　负荷频率控制模型

机组出力与接入负荷总量不平衡会引起电力系统频率的波动。而负荷频率控制可使系统中总的发电出力与用电负荷达到平衡,进而维持频率的稳定[11]。

在互联电力系统中(其负荷频率控制框图如附录中图 A1 所示[12]),为了保证系统的稳定运行,需保持各区域间的功率交换为稳定值,负荷频率控制一般将区域控制差量 ACE(Area Control Error)作为反馈量设计,达到维持互联系统频率稳定的目的。区域 i 的 ACE 的表达式为:

$$\mathrm{ACE}_i=\Delta P_{\mathrm{tie},i}+B_i\Delta f_i \tag{1}$$

其中,$\Delta P_{\mathrm{tie},i}$为区域 i 的联络线功率;Δf_i 为区域 i 的频率偏差;B_i 为偏差因子,可由式(2)得到。

$$B_i=\frac{1}{R_i}+D_i \tag{2}$$

其中,R_i 为区域 i 中调速器的调差系数;D_i 为区域 i 的负荷阻尼系数。本文中的控制器也将 ACE 作为输出反馈项。

1.2　EV 分布式辅助调频控制模型

1.2.1　EV 入网的一次调频模型

EV 一般通过频率下垂控制参与电网的一次调频[9],同时考虑到 EV 的电池充放电静态特性,引入延时环节,可得 EV 的等效传递函数[8]见式(3)。

$$\Delta P_{\mathrm{E}}(s)=\frac{K_{\mathrm{E}}}{1+sT_{\mathrm{E}}}\Delta f \tag{3}$$

其中,ΔP_{E} 为 EV 对电网的充放电功率;T_{E} 为 EV 的充放电时间常数;K_{E} 为 EV 的下垂控制参数;Δf 为频率偏差。

由附录中的图 A1 可知传统的发电机-负荷模型为:

$$\Delta P_{\mathrm{m}}-\Delta P_{\mathrm{l}}=(Ms+D)\Delta f \tag{4}$$

其中,ΔP_{l} 为负荷扰动;$\Delta P_{\mathrm{m}}=\sum_{k=1}^{n}\Delta P_{\mathrm{m}k}$ 为发电机总输出功率,$\Delta P_{\mathrm{m}k}$为发电机 k 的输出功率,n 为发电机总数;M 为发电机的惯性常数;D 为负荷阻尼系数。

由式(3)、(4)可得 EV 参与电力系统一次调频的数学模型为:

$$\Delta P_{\mathrm{m}}-\Delta P_{\mathrm{l}}=(Ms+D)\Delta f+\frac{K_{\mathrm{E}}}{1+sT_{\mathrm{E}}}\Delta f \tag{5}$$

由式(5)可以得到 EV 参与下的一次调频模型框图,如图 1 所示。

结合多区域互联电力系统的负荷频率控制模型与图 1 可得,在多区域系统中第 i 个含 EV 系统的负荷频率控制框图如图 2 所示。图中,N 为系统内的

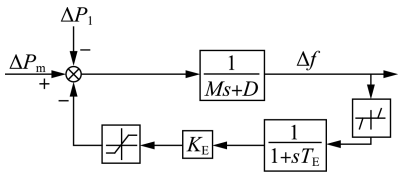


图 1　EV 参与下的一次调频模型

Fig.1　Primary frequency regulation model with participation of EVs

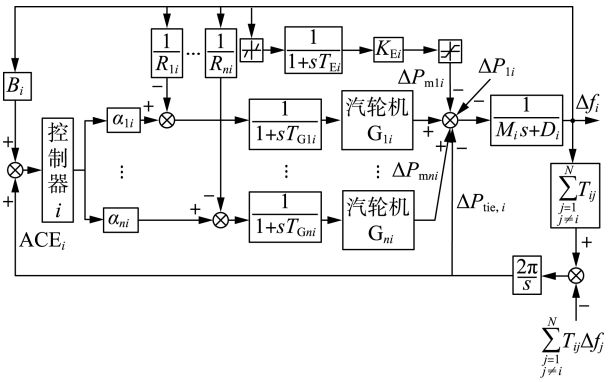


图 2　含 EV 的多区域互联电力系统负荷频率控制

Fig.2　Load frequency control of interconnected multi-area system with EVs

区域数;$T_{Gki}(k=1,2,\cdots,n)$为区域 i 中发电机 k 调速器的时间常数;$\Delta P_{\mathrm{m}ki}$为区域 i 中发电机 k 的输出功率;R_{ki}为区域 i 中发电机 k 调速器的调差系数;T_{ij}为区域 i 和 j 间的同步转矩系数;α_{ki}为区域 i 中发电机 k 的出力权重,本文考虑各发电机的权重相同。

此外,系统中汽轮机的常见机型有非再热式和再热式汽轮机,式(6)、式(7)分别给出了 2 种机型的等效传递函数[12]。

$$G_{\mathrm{T}}(s)=\frac{K_{\mathrm{T}}}{1+sT_{\mathrm{T}}} \tag{6}$$

$$G_{\mathrm{T}}(s)=\frac{K_{\mathrm{T}}(1+sK_{\mathrm{r}}T_{\mathrm{r}})}{(1+sT_{\mathrm{T}})(1+sT_{\mathrm{r}})} \tag{7}$$

其中,K_{T} 为增益;T_{T} 为汽容时间常数;T_{r} 为再热时间常数;K_{r} 为再热系数。式(6)为非再热式汽轮机的模型;式(7)为再热式汽轮机的模型。

1.2.2　EV 的 SOC 维持策略

EV 参与电网调频的同时,需实时调节 EV 电池的 SOC 以满足车主的用电需求。本文利用图 3 所示的控制原理对参与调频服务的 EV 的 SOC 进行调整,使其维持在初始状态,同时制定充电计划用于非调频时段[9]。图 3 中,K_{OE}为联合优化后 EV 的充放电下垂系数;SOC_i、$\mathrm{SOC}_i^{\mathrm{in}}$、$\mathrm{SOC}_i^{\max}$、$\mathrm{SOC}_i^{\min}$ 分别为第 i 辆 EV 的 SOC、在初始时刻的 SOC、允许达到的最大 SOC 和最小 SOC。

考虑到 EV 是分布式接入电网的,故对单辆 EV 进行分析。

图 3 所示的控制原理可以通过分段函数的方式

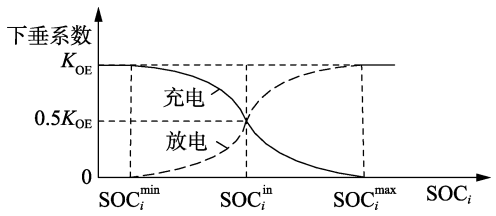


图 3 EV 的 SOC 控制原理

Fig.3 Control principle of EV's SOC

描述如下。

a. 当 $SOC_{i,k} \leqslant SOC_i^{min}$ 时,有:

$$\begin{cases} K_{i,k}^{c} = K_{OE} \\ K_{i,k}^{d} = 0 \end{cases} \tag{8}$$

b. 当 $SOC_{i,k} \geqslant SOC_i^{max}$ 时,有:

$$\begin{cases} K_{i,k}^{c} = 0 \\ K_{i,k}^{d} = K_{OE} \end{cases} \tag{9}$$

c. 当 $SOC_i^{min} < SOC_{i,k} < SOC_i^{in}$ 时,有:

$$\begin{cases} K_{i,k}^{c} = \dfrac{1}{2} K_{OE} \left[1 + \sqrt{1 - \dfrac{(SOC_{i,k} - SOC_i^{min})^2}{(SOC_i^{in} - SOC_i^{min})^2}} \right] \\ K_{i,k}^{d} = \dfrac{1}{2} K_{OE} \left[1 - \sqrt{1 - \dfrac{(SOC_{i,k} - SOC_i^{min})^2}{(SOC_i^{in} - SOC_i^{min})^2}} \right] \end{cases} \tag{10}$$

d. 当 $SOC_i^{in} \leqslant SOC_{i,k} < SOC_i^{max}$ 时,有:

$$\begin{cases} K_{i,k}^{c} = \dfrac{1}{2} K_{OE} \left[1 - \sqrt{1 - \dfrac{(SOC_{i,k} - SOC_i^{max})^2}{(SOC_i^{in} - SOC_i^{max})^2}} \right] \\ K_{i,k}^{d} = \dfrac{1}{2} K_{OE} \left[1 + \sqrt{1 - \dfrac{(SOC_{i,k} - SOC_i^{max})^2}{(SOC_i^{in} - SOC_i^{max})^2}} \right] \end{cases} \tag{11}$$

其中,$SOC_{i,k}$ 为第 i 辆 EV 在 k 时刻的 SOC;$K_{i,k}^{c}$、$K_{i,k}^{d}$ 分别为第 i 辆 EV 在 k 时刻的充、放电下垂系数。

由此,可利用下垂控制原理得到 EV 的充放电功率 $P'_{i,k}$(此时不考虑计划充电的功率)为:

$$P'_{i,k} = \begin{cases} 0 & -f_d \leqslant \Delta f \leqslant f_d \\ -P_{max} & \Delta f K_{i,k}^{c} \leqslant -P_{max}, \Delta f < -f_d \\ P_{max} & \Delta f K_{i,k}^{d} \geqslant P_{max}, \Delta f > f_d \\ K_{i,k}^{c} \Delta f & \Delta f K_{i,k}^{c} < P_{max}, \Delta f > f_d \\ K_{i,k}^{d} \Delta f & \Delta f K_{i,k}^{d} > -P_{max}, \Delta f < -f_d \end{cases} \tag{12}$$

其中,f_d 为调频死区;P_{max} 为 EV 的最大充放电功率。

通过上述原理可知,当 $SOC_{i,k} \geqslant SOC_i^{in}$ 时,始终有 $K_{i,k}^{d} > K_{i,k}^{c}$,即保证了 EV 向电网释放的能量大于从电网吸收的能量;相反地,当 $SOC_{i,k} \leqslant SOC_i^{in}$ 时,EV 向电网释放的能量小于从电网吸收的能量,即促使 EV 的 SOC 向 SOC_i^{in} 趋近,尤其当满足 $SOC_{i,k} = SOC_i^{in}$ 时,$K_{i,k}^{d} = K_{i,k}^{c}$,便可维持 EV 的 SOC。

为了确保 EV 在离开电网时其 SOC 满足车主的需求,加入非调频时段及充电模式下的充电计划,如式(13)所示。

$$P_{i,k}^{c} = C_E \frac{SOC_i^{P} - SOC_{i,k}}{t_i^{out} - t_i^{in}} \tag{13}$$

其中,C_E 为 EV 电池的额定容量;$P_{i,k}^{c}$ 为第 i 辆电动车在 k 时刻的动态充电功率;SOC_i^{P} 为第 i 辆 EV 的期望 SOC;t_i^{in}、t_i^{out} 分别为第 i 辆 EV 入网参与调频与退出电网的时刻。

由式(8)—(13)可得 EV 的充放电功率为:

$$P_{i,k} = \begin{cases} P_{i,k}^{c} & -f_d \leqslant \Delta f \leqslant f_d \\ -P_{max} & \Delta f K_{i,k}^{d} \leqslant -P_{max}, \Delta f < -f_d \\ P_{max} & \Delta f K_{i,k}^{c} + P_{i,k}^{c} \geqslant P_{max}, \Delta f > f_d \\ K_{i,k}^{c} \Delta f + P_{i,k}^{c} & \Delta f K_{i,k}^{c} + P_{i,k}^{c} < P_{max}, \Delta f > f_d \\ K_{i,k}^{d} \Delta f & \Delta f K_{i,k}^{d} > -P_{max}, \Delta f < -f_d \end{cases} \tag{14}$$

其中,$P_{i,k}$ 为第 i 辆 EV 在 k 时刻的充放电功率。

上述过程可用图 4 所示原理表示。

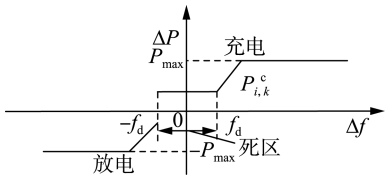


图 4 EV 计划充电原理

Fig.4 Principle of EV charging plan

当负荷突然接入时,同步发电机的输入机械功率小于其电磁功率,发电机转子减速,系统频率减小,若 $\Delta f < -f_d$,此时 V2G 控制器将控制每辆可参与调频的 EV 开始向电网放电,以平衡功率;反之,当负荷突然减少时,系统频率增加,若此时 $\Delta f > f_d$,则控制器向 EV 发出指令开始充电;若系统频率偏移 Δf 在死区范围 $[-f_d, f_d]$ 内,EV 不参与调频服务,系统依靠自身的负荷频率控制进行调频,EV 则进行计划充电,以达到用户的用电需求。

考虑到实际电池的充放电效率,可得参与调频的 N_{ev} 辆 EV 实际总充放电功率的表达式为(本文考虑电池的充放电效率一致):

$$P_k^{E} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{ev}} P_{i,k} / \eta & P_{i,k} > 0 \\ \sum_{i=1}^{N_{ev}} P_{i,k} \eta & P_{i,k} < 0 \end{cases} \tag{15}$$

其中,η 为电池的充放电效率。

2 含 EV 的负荷频率控制联合优化模型

当 EV 并网参与一次调频后,由图 2 可知,其充放电控制与同步发电机的负荷频率控制单元共同实现电力系统的频率调整。此时,为了协调各控制器的工作、优化系统的频率响应特性,需考虑负荷特

性、机组特性等，重新整定优化原有参数。

考虑到负荷频率控制模型通常采用比例积分（PI）控制，故本文要优化的对象为 EV 的频率下垂控制参数 K_E 以及二次频率控制的比例控制参数 K_p、积分控制参数 K_i。

2.1　优化目标函数

由于 ITAE 对系统参数的变化具有较强的灵敏度[13]，故本文将目标函数设为 ITAE，即以时间 t 内系统频率偏差的绝对值乘以时间 t 的积分为目标函数，以此建立 EV 下垂控制及系统二次调频参数的优化模型。

当系统内发生频率波动时，为了获得较好的调频性能，需同时快速减小各区域的频率偏差，故本文以 J_{ITAE} 最小为目标进行优化，如式（16）所示。

$$J_{ITAE}=\int_0^t t|\Delta f_1|\mathrm{d}t+\cdots+\int_0^t t|\Delta f_N|\mathrm{d}t \quad (16)$$

2.2　约束条件

在实际应用中，考虑到 EV 电池特性的限制（如充放电速率等）及负荷频率控制特性，需对待优化的参数（EV 的频率下垂控制参数 K_E 及二次频率控制的比例控制参数 K_p、积分控制参数 K_i）设定有效的工作范围，因此，本文所建立优化模型的约束条件为：

$$\begin{cases}K_{Emin}\leqslant K_{Ei}\leqslant K_{Emax}\\ K_{pmin}\leqslant K_{pi}\leqslant K_{pmax}\\ K_{imin}\leqslant K_{ii}\leqslant K_{imax}\end{cases} \quad (17)$$

其中，K_{Emax}、K_{pmax}、K_{imax} 分别为 K_E、K_p、K_i 的最大值；K_{Emin}、K_{pmin}、K_{imin} 分别为 K_E、K_p、K_i 的最小值。

2.3　优化流程

粒子群优化算法具有实现简单、收敛速度快等特点[14]，因此，本文采用粒子群优化算法对式（16）所示的模型进行优化。

本文采用粒子群优化算法对 EV 的下垂控制参数及二次调频参数进行联合优化，具体流程如下。

a. 搭建含 EV 辅助调频的多区域负荷频率控制模型，并根据不同的负荷特性及机组特性，产生频率波动场景。

b. 初始化粒子群，随机产生 N_a 组满足式（17）的粒子。

c. 将所得粒子输入频率控制模型中，并仿真得到各区域的频率偏差输出。

d. 根据式（16）计算该组粒子所对应的 J_{ITAE}。

e. 根据 J_{ITAE} 更新迭代得到个体最优、全局最优。

f. 令迭代粒子数 $m=m+1$，若此时顶层迭代粒子数已达 M_a，则令迭代次数 $k=k+1$；否则返回步骤 **b**。

g. 若迭代次数 k 小于最大迭代次数 K，则返回步骤 **b**；否则所得全局最优解即为最优联合优化控制参数，求解结束。

3　算例仿真

基于含 EV 的 2 区域互联系统对本文所提的频率控制器联合优化方法进行仿真验证。

首先做以下假设：并网的 EV 均可服务于电网并参与调频；参与电网调频的 EV 的可调用容量充足；不考虑 EV 的随机因素及电池寿命等影响因素。

电网及 EV 模型参数见附录中表 A1[8]，未优化的调频控制器参数见附录中表 A2[8]。

3.1　阶跃负载扰动

在 MATLAB/Simulink 中搭建含 EV 的 2 区域互联系统的仿真模型（见图 2），此时各区域均采用单机组。通过与文献[8]中的频率控制器进行仿真对比，分析联合优化前、后的系统调频性能，模型中的原动机采用非再热式汽轮机[8]，此时暂不靠考虑模型中的死区环节，各优化参数的取值为 $8\leqslant K_E\leqslant 12$，$0\leqslant K_p\leqslant 0.2$，$-0.2\leqslant K_i\leqslant 0$。在 2 s 时施加 0.05 p.u.的阶跃信号作为接入负荷，50 s 时切除该负荷，以模拟系统中的负荷波动。优化后的控制器参数见表 1。

表 1　优化后调频控制器参数

Table 1　Parameters of frequency regulation controller after optimization

参数	区域 1			区域 2		
	仅优化 PI 参数	仅优化 K_E	联合优化	仅优化 PI 参数	仅优化 K_E	联合优化
K_{OE}	10.00	11.900	11.44	10.00	9.23	11.11
K_p	0.03	0.005	0.02	0.01	0.02	0.02
K_i	−0.03	−0.070	−0.19	−0.02	−0.05	−0.03

利用上述参数仿真得到系统的频率偏差动态响应。对比系统在无 EV 参与调频、含 EV 参与调频和联合优化频率控制器 3 种情况下区域 1 的频率偏差，如图 5 所示。

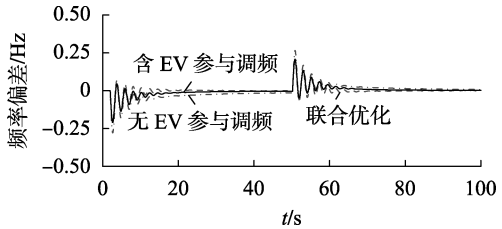


图 5　区域 1 的频率偏差

Fig.5　Frequency deviation of Area 1

由图 5 知，负荷突然增加后，若系统无 EV 参与调频，最大频率偏差为 0.285 Hz，调节时间为 49.1 s；若系统含 EV 参与调频，最大频率偏差为 0.210 Hz，相比前者减少了 26.3%，调节时间为 41.5 s，相比前者减少了 16.2%；而联合优化系统的频率控制器后，最大频率偏差仅为 0.205 Hz，调节时间为 19.3 s，较前两者都有明显的下降，可见联合优化后系统的频率稳态响应速度得到大幅提升。同样地，切除该负荷后，联合优化后的系统也具有较好的调频性能。

图6为系统在上述3种情况下联络线传输功率的动态响应。

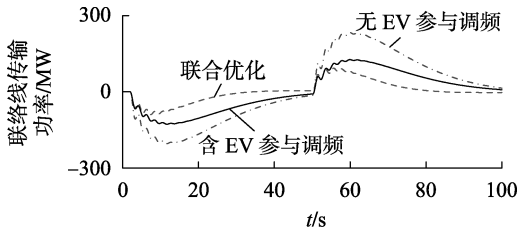


图6 联络线传输功率

Fig.6 Transmission power of tie-line

由图6可知,负荷突然增加后,若系统无EV参与调频,联络线传输功率峰值可达300 MW,40 s后联络线依然存在功率传输;若系统含EV参与调频,联络线传输功率峰值只有160 MW,但40 s后联络线依然存在传输功率;而联合优化系统的频率控制器后,联络线传输功率峰值仅有80 MW,较含EV参与调频的情况减少了50%,并且传输功率在40 s左右时归零。50 s时切除该负荷,联合优化系统的频率控制器后,联络线传输功率同样最小,传输功率归零的速度最快。

为了进一步分析本文所提联合优化方法对系统调频性能改善的有效性,仿真得到仅优化EV的频率下垂控制参数K_E、仅优化二次调频控制参数和联合优化3种情况下区域1的频率偏差及联络线传输功率的动态响应,结果分别如图7、图8所示。

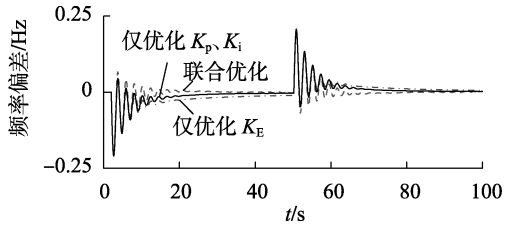


图7 区域1的频率偏差

Fig.7 Frequency deviation of Area 1

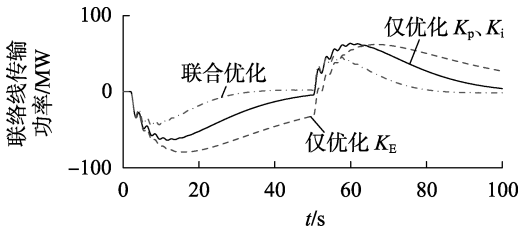


图8 联络线传输功率

Fig.8 Transmission power of tie-line

由图7、8可知,当系统仅优化参数K_E或者仅优化二次调频控制参数K_p、K_i时,调频效果欠佳;而当系统进行联合优化时,系统频率偏差及联络线传输功率峰值最低,传输功率归零的速度最快。

以上仿真模型中原动机模型均采用非再热式汽轮机且为单机组,为了更加符合实际情况,以下仿真采用多机组同时在线模式,每个区域均考虑2台再热式汽轮机及1台非再热式汽轮机,并加入调速器死区及EV调频死区,对本文所提联合优化方法进行仿真验证。

基于频率控制器参数的有效工作范围($0.2\leqslant K_p\leqslant 1.2$,$-0.8\leqslant K_i\leqslant -0.01$)[12],$K_E$的优化范围不变,利用本文所提联合优化方法得到频率控制器参数,如表2所示。

表2 优化前、后调频控制器参数

Table 2 Parameters of frequency regulation controller before and after optimization

参数	区域1				区域2			
	优化前	仅优化PI参数	仅优化K_E	联合优化	优化前	仅优化PI参数	仅优化K_E	联合优化
K_{0E}	10	10	10.91	9.37	10	10	11.10	10.09
K_p	1.2	0.43	1.2	0.27	0.4	0.72	0.4	0.21
K_i	−1.2	−0.28	−1.2	−0.15	−0.3	−0.06	−0.3	−0.02

仿真中调速器的死区设置为0.03 Hz,EV辅助调频死区设置为0.01 Hz,利用描述函数将上述死区线性化,根据文献[15]可得计及死区的调速器及EV的传递函数分别为$G_G(s)=\dfrac{0.8-0.076s}{1+sT_G}$、$G_E(s)=\dfrac{1-0.057s}{1+sT_E}$。

利用上述传递函数代替原模型中调速器、EV的等效传递函数,并根据表2所示控制器参数,仿真得到区域1的频率偏差动态响应及联络线传输功率动态响应分别如图9、图10所示。

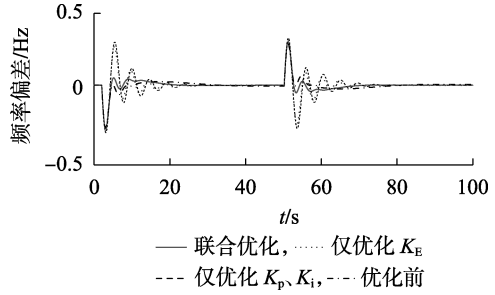


图9 区域1的频率偏差

Fig.9 Frequency deviation of Area 1

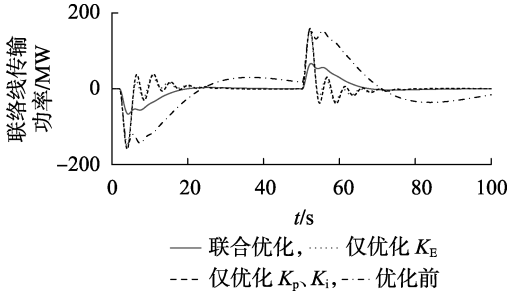


图10 联络线传输功率

Fig.10 Transmission power of tie-line

由图 9、10 可知，当负荷发生变化时，系统联合优化控制器参数后，频率偏差及联络线传输功率的波动幅值较小，恢复到稳态的速度最快。由此可知，在多机组并考虑调节死区的情况下，本文所提联合优化方法能够有效地优化 EV 辅助调频与系统二次调频的协调控制，从而提高系统的调频性能。

3.2　长时间随机负荷扰动

为了研究联合优化后的频率控制器对维持 EV 电池 SOC 的影响，基于上述优化结果，并根据 1.2.2 节的原理，进行了长时间随机负荷扰动仿真实验。据统计[16]，通常 EV 在 08:00—17:00 为闲置状态，具备入网参与系统调频的基本条件，故选择此时段进行仿真。

设定 2 组长时间段随机负荷扰动如附录中图 A2 所示。电网参数及 EV 电池的 SOC 初始值见附录中表 A1。

采用上述设定，在 2 区域多机组并考虑调节死区的系统中进行仿真，对比联合优化前、后系统中区域 1 的频率偏差动态响应与联络线传输功率动态响应，分别如图 11 和图 12 所示。

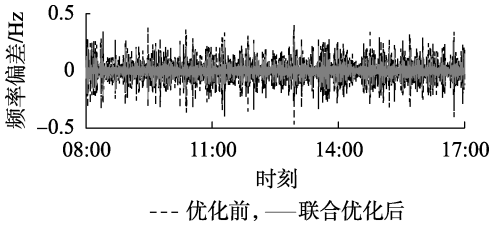


图 11　区域 1 的频率偏差

Fig.11　Frequency deviation of Area 1

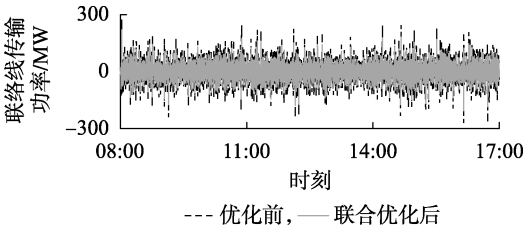


图 12　联络线传输功率

Fig.12　Transmission power of tie-line

由图 11 可知，在长时间随机负荷扰动下，联合优化后系统的频率偏差可保持在 ±0.187 Hz 内，而优化前系统的频率偏差范围可达 ±0.378 Hz。由图 12 可知，联合优化后系统的联络线传输功率波动稳定在 ±96 MW 范围内，远小于优化前的联络线传输功率波动范围 ±180 MW。由此可知，在长时间随机负荷扰动下，联合优化能够提高系统的调频性能，有效地减小系统频率及联络线的功率波动。

由于区域 1 和 2 中 EV 的 SOC 都服从正态分布 N(0.4,0.01)，故分别取 EV 的 SOC_i^{in} 为 0.3、0.5 进行仿真实验，得到实时 SOC 如图 13 所示。

由图 13 可知，SOC_i^{in} 为 0.3、0.5 的 EV 在联合优化后参与系统调频服务，利用 1.2.2 节的原理，都能够保证其 SOC 在调频服务结束（即 EV 离开电网）时达到车主期望的 SOC 范围内。

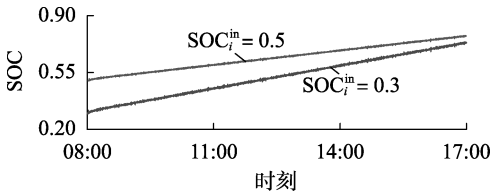


图 13　联合优化下 EV 的实时 SOC

Fig.13　Real-time SOC of EVs after joint optimization

由以上分析可知，在含 EV 的 2 区域互联电力系统中，若仅对 EV 的频率下垂控制参数或二次调频控制参数分别进行优化，系统的调频性能不能得到充分改善，甚至会减弱调频效果，而利用本文所提联合优化方法则可以实现 EV 辅助调频与电力系统二次调频的协调控制，从而使系统的频率稳态响应速度得到大幅提升，优化系统的调频性能，并且能够满足车主的用电需求。

4　结论

本文首先搭建了含 EV 的多区域电力系统频率控制模型，在此基础上建立了 EV 下垂控制与系统二次调频的联合优化模型，并考虑多机组在线及调节死区的情况，实现了 EV 分布式辅助调频的负荷频率控制联合优化。基于研究结果可得如下结论。

a. 本文所提联合优化方法可以有效地改善系统的调频性能，加快系统的稳态响应速度，相较于优化前，优化后的频率最大偏差减小了近 30%，平抑频率波动的时间最多降低了 60%。

b. 在实际应用中，可根据负荷预测数据，提前利用本文所提联合优化方法设计控制器，提高控制器的鲁棒性能，使 EV 更好地提供调频服务。

c. 从长时间尺度上看，联合优化后的系统有效地抑制了系统的频率偏差及联络线传输功率波动，同时保证了 EV 用户对用电的需求。此外，仿真算例中考虑了多机组同时在线的情况及调速器的调节死区、EV 调频死区，更贴近实际情况，这对于今后关于 EV 辅助电网调频的研究有一定的参考价值。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 何明杰，彭春华，曹文辉，等. 考虑电动汽车规模化入网的动态经济调度[J]. 电力自动化设备，2013，33(9)：82-88.
HE Mingjie，PENG Chunhua，CAO Wenhui，et al. Dynamic economic dispatch considering large-scale integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment，2013，33(9)：82-88.

[2] KEMPTON W，TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power fundamentals：calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources，2005，144(1)：268-279.

[3] 郭建龙，文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备，2015，35(6)：1-9，30.

GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9, 30.
[4] SORTOMME E, EL-SHARKAWI M A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 351-359.
[5] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10, 25.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.
[6] 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.
[7] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140.
HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.
[8] 张谦, 周林, 周雒维, 等. 计及电动汽车充放电静态频率特性的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 74-80.
ZHANG Qian, ZHOU Lin, ZHOU Luowei, et al. Load frequency control considering charging and discharging static frequency characteristics of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 74-80.
[9] 刘辉, 魏岩岩, 汪旎, 等. 电动汽车入网一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 90-95.
LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 90-95.
[10] 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.
[11] 吴忠强, 张伟, 李峰, 等. 基于云神经网络自适应逆系统的电力系统负荷频率控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 86-91, 98.
WU Zhongqiang, ZHANG Wei, LI Feng, et al. Load frequency control of power system based on cloud neural network adaptive inverse system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 86-91, 98.
[12] BEVRANI H. Robust power system frequency control[M]. New York, USA: Springer, 2009: 22-26.
[13] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于ITAE指标的PID参数整定方法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 206-210.
XU Feng, LI Donghai, XUE Yali. Comparing and optimum seeking of PID tuning methods base on ITAE index[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 206-210.
[14] 杨佳艺, 赵成勇, 苑宾, 等. 基于粒子群优化算法的VSC-HVDC系统的控制参数优化策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 178-183.
YANG Jiayi, ZHAO Chengyong, YUAN Bin, et al. Parameter optimization of VSC-HVDC control system based on particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 178-183.
[15] TRIPATHY S C, HOPE G S, MALIK O P. Optimisation of load-frequency control parameters for power systems with reheat steam turbines and governor deadband nonlinearity[J]. IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution, 1982, 129(1): 10-16.
[16] LUO Z W, SONG Y H, HU Z C, et al. Forecasting charging load of plug-in electric vehicles in China[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, USA: IEEE, 2011: 1-8.

作者简介:


杨健维

杨健维(1983—),女,辽宁凌源人,副教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制、城市电网安全预警、电动汽车并网(**E-mail**:jwyang@swjtu.cn);

董鸿志(1994—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车并网、电动汽车辅助调频(**E-mail**:donghz427@163.com);

廖 凯(1989—),男,四川巴中人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(**E-mail**:liaokai.lk@foxmail.com);

蔡亮成(1983—),男,四川成都人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(**E-mail**:caispss@163.com)。

Joint optimization of load frequency control considering auxiliary frequency regulation of electric vehicles

YANG Jianwei, DONG Hongzhi, LIAO Kai, CAI Liangcheng
(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The droop control characteristics of EVs(Electric Vehicles) will impact the frequency regulation performance of the original load frequency control in the power system when EVs participate in the primary frequency regulation by V2G(Vehicle-to-Grid) technology. So, a joint optimization method of load frequency control considering the auxiliary frequency regulation of EVs is proposed. A load frequency control model of multi-area multi-generator system with EVs is established. On this basis, in view of the battery characteristics and the effective working range of secondary frequency regulation output of EVs, and considering the characteristics of generators in the system, the joint optimization model between the auxiliary frequency regulation of EVs and the secondary frequency regulation of traditional generators is set up with the ITAE(Integral Time Absolute Error) as the objective, and the model is solved by particle swarm optimization algorithm. The dynamic responses of the system with step load disturbance and long-term random load disturbance before and after the joint optimization are simulated, analyzed and compared in MATLAB/Simulink. Simulative results show that the proposed joint optimization method can effectively improve the steady state response speed of load frequency control system, optimize the frequency regulation performance of system and ensure the electricity demands of EV users.

Key words: electric vehicles; V2G; load frequency control; auxiliary frequency regulation; droop control; joint optimization

附　录

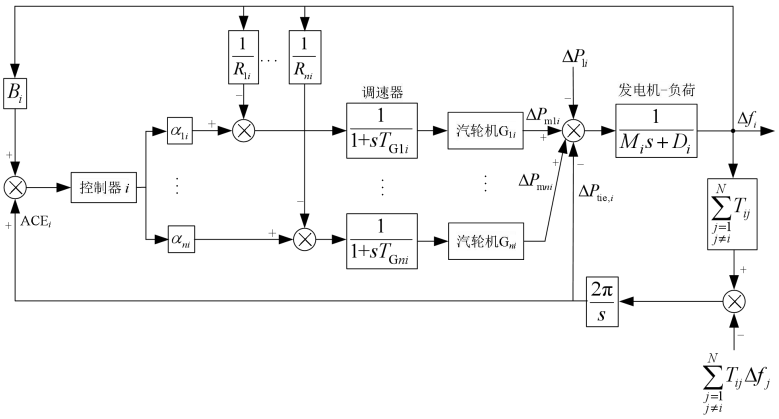


图 A1　多区域互联电力系统负荷频率控制

Fig.A1 Load frequency control of interconnected multi-area system

表 A1　仿真模型参数

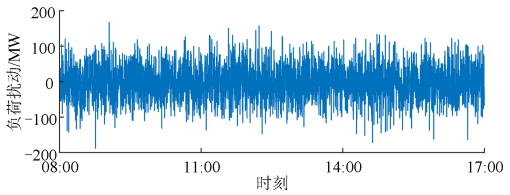
Table A1 Parameters of simulation model

参数	区域 1	区域 2
系统容量/MW	2000	1 000
EV 数量/辆	30000	10 000
C_E/(kW·h)	32	32
SOC^{max}	0.9	0.9
SOC^{min}	0.1	0.1
SOC^{in}	N(0.4，0.01)	N(0.4，0.01)
SOC^{P}	N(0.8，0.01)	N(0.8，0.01)
η	0.92	0.92
P_{max}/kW	7	7
M/(p.u.·Hz^{-1})	5	4
D/(p.u.·s^{-1})	0.6	0.9
R/(p.u.·Hz^{-1})	0.05	0.062
T_G/s	0.2	0.3
T_T/s	0.5	0.6
T_E/s	1	1
K_T	1	1
B/(p.u.·Hz^{-1})	20.6	16.9
K_r	10	10
T_f/s	0.2	0.2

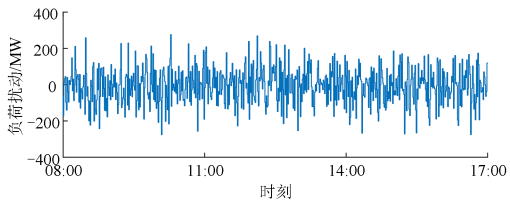
表 A2　调频控制器参数

Table A2 Parameters of frequency regulation controller

区域	不计及 V2G		计及 V2G		
	K_p	K_i	K_p	K_i	K_E
1	0.10	−0.18	0.005	−0.07	10
2	0.05	−0.06	0.020	−0.05	10



（a）间隔时间为10 s



（b）间隔时间为50 s

图 A2 负荷扰动

Fig.A2 Load fluctuations