

DOI: 10.7667/PSPC162069

计及 PEV 聚合器的含可再生能源电力系统 AGC 调节功率的协调调度

侯贤军^{1,2}, 罗春辉³, 武学伟⁴, 刘月贤⁵, 马春艳¹

(1. 湖北汽车工业学院电气与信息工程学院, 湖北 十堰 442002; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;
3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 4. 国网兰州供电公司, 甘肃 兰州 730070;
5. 国网成都供电公司, 四川 成都 610031)

摘要: 随着可再生能源的大规模并网, 其间歇和随机特性给电力系统的频率稳定和控制带来巨大挑战。基于现有自动发电控制框架, 根据常规发电机组和插电式电动车(PEVs)的互补特性, 提出了一个基于模型预测控制(MPC)的优化控制框架。MPC 负荷分配器根据常规发电机组和 PEVs 不同时间尺度的动态和 AGC 执行周期, 在满足调节功率和电能约束的条件下, 协调控制来自常规发电机组和 PEVs 的调节功率, 使 ACE 跟踪误差和调节成本最小。仿真结果证明, 提出的方法能够实现 AGC 性能的改善和调节成本的节约。

关键词: 可再生能源; 自动发电控制; PEVs; 聚合器; 协调控制

Coordinated dispatching of AGC regulation power considering PEV aggregator in power system with large-scale renewable energy sources

HOU Maojun^{1,2}, LUO Chunhui³, WU Xuewei⁴, LIU Yuexian⁵, MA Chunyan¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyuan 442002, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. State Grid Lanzhou Power Supply Company, Lanzhou 730070, China; 5. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the large-scale interconnection of Renewable Energy Sources (RESs), their intermittent and stochastic characteristics bring great challenges to the frequency stability and control of the power system. Based on the existing automatic generation control framework, an optimal control framework based on model predictive control (MPC) is proposed according to the complementary characteristics of conventional generators and plug-in electric vehicles (PEVs). The MPC load distributor can control the regulation power from conventional generator sets and PEVs according to the dynamic and AGC execution cycles of conventional generator sets and the PEVs at different time scales, so that the ACE tracking error and the adjustment cost can be minimized by meeting regulation power and power constraints. Simulation results show that the proposed method can achieve AGC performance improvement and cost saving.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50937002).

Key words: renewable energy sources; AGC; PEVs; aggregator; coordinated control

0 引言

在经济发展、能源供给和环境污染之间的矛盾日益加剧的背景下, 节能减排和减少对化石燃料的依赖已经成为社会可持续发展迫切需要解决的问题。

在此背景下, 可再生能源受到各国政府和发电企业的关注。可再生能源在电力消费中所占份额^[1-3]: 德国 2007 年为 14%, 预计 2030 年为 50%; 日本最近修订了中期目标, 将 2020 年 14 GW 光伏发电容量增加 1 倍到 28 GW, 日本的长期目标是到 2030 年要达到 53 GW 的发电容量; 丹麦规划至 2025 年可再生能源的发电量须占电能消耗总量的 30%。因

此, 未来的电网将是一个可再生能源渗透率很高的电网。由于可再生能源(Renewable Energy Sources, RESs)具有间歇性和随机性的特点, 它们大规模接入电网对电力系统的运行将带来显著影响。例如, 风电渗透率的增大, 将会给电力系统的平衡能力以及自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)系统的运行带来很大挑战^[4-9]。

插电式电动汽车(Plug-in Electric Vehicles, PEVs)是一种极佳的可控负荷和电源资源, 其数量在今后 20 年将有快速增长。在丹麦, 到 2020 年, 估计有 10% 的乘用车是电动汽车; 在中国, 到 2030 年电动汽车高峰负荷充电将达 479GW, 占 2009 年全国装机总容量(874GW)的 54.8%^[10-11]。

利用 PEVs 在供需两端参与分配调节功率的控制及其优化的一些方法也已经在最新的研究和开发工作中被提出^[12-15]。

文献[12]将系统所需的平衡功率分解成不同的时变周期分量, 储能系统对每小时内的分量和实时分量进行补偿, 由于不包含 SOC 约束, 控制策略不能保证储能系统总能提供系统所需的调节功率。文献[13]提出的调节算法中则采用了比例分配策略。每辆 PEV 围绕其首选工作点(Preferred Operating Point, POP)改变充电速率以响应系统调频信号, 每车的调节功率按照 AGC 信号与系统调频容量的比例被分配, 但算法没有考虑 PEVs 电池储能的限制。文献[14]通过在每个时间间隔得到常规机组和电池储能系统的可用调频容量, 提出基于比例和优先级的调频信号动态分配策略。然而, 基于优先级的考虑会增加储能系统的充放电深度和频次, 影响储能系统的寿命。

这些文献的研究重点都是基于 AGC 控制框架, 改进调节功率的分配策略以改善和提升系统的频率响应性能。而下面的研究则侧重于基于成本考虑的调节功率的优化分配。文献[16]将配电层分成若干子系统。在子系统中的可再生能源、储能电池、热电机组和可控负荷之间优化分配子系统与其他系统的联络线功率偏差, 提出的方法被看作是现有负荷频率控制(Load Frequency Control, LFC)的补充。文献[17]通过多速率模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)方法对供应侧的调节与需求侧的需求响应一起进行控制, 减少电网的供需不平衡。多速率 MPC 基于供需两侧饱和和非线性的动态及其相应约束, 优化分配不平衡功率。文献[18]的 MPC 框架作为辅助服务的选择算法, 在可用功率、电能和爬坡能力约束下, 能够有效地管理和控制电源的备用功率分配。这些文献的不足是要么没有考虑含可再

生能源的 AGC 等值模型, 要么没有充分考虑含可再生能源 AGC 模型的能量和容量约束, 电源和负荷的控制模型也比较简单。

本文的研究重点在于将 PEVs 聚合器应用于一个含高渗透率 RESs 的 AGC 控制区域, 通过 PEVs 聚合器参与 ACE 的分配, 节约调节成本并改善 AGC 的性能。和上述文献的研究相比, 不同之处如下:

- 1) 考虑了聚合器的快速响应能力和 RESs 对系统功率波动的影响。
- 2) 提出了含可再生能源和聚合器的 AGC 控制区域模型。
- 3) 给出了 AGC 机组调节过程的数学描述。
- 4) 提出了基于成本最优的 ACE 的优化分配目标函数, 实现调节成本的节约和 AGC 性能的改善。

本文将提出的聚合器模型纳入现有 AGC 模型框架, 并建立一个 MPC 优化控制框架, 协调常规机组和 PEVs 调节功率的输出。仿真在一个具有高风电渗透率的 AGC 控制区域中实现。本文的其余部分如下: 第一节将 PEVs 纳入含 RESs 的 AGC 控制区域模型; 第二节提出 AGC 控制区域中模型的约束; 第三节给出带约束的常规机组和聚合器模型; 第四节建立 MPC 优化框架, 优化调节功率的分配; 第五节建立仿真系统并对仿真结果进行讨论; 最后的第六节总结全文。

1 集成 PEVs 的 AGC 控制区域模型

未来的电力系统中, 电网将吸纳大量的可再生能源, 现有发电调度的方式进行电力平衡并不是最经济有效的方式。采用需求调度方式追踪可再生能源的预测出力曲线是未来电力系统调度的一种有效补充。发电调度通过可控电源来平衡不可控负荷, 需求调度通过调度可控负荷来平衡可再生能源的预测出力。因此, 在一个 AGC 控制区域中, 不平衡功率可表示为

$$\Delta P_s = \Delta P_L - \Delta P_{RES} \quad (1)$$

式中: ΔP_s 表示 AGC 控制区域的不平衡功率; ΔP_L 表示 AGC 控制区域的计划外负荷; ΔP_{RES} 表示 AGC 控制区域的可再生能源预测和实际出力的差值。

由式(1)可知, 可再生能源并网将导致 ΔP_{Si} 波动增大。现有 AGC 控制是在一段时间内试图使平均的发电出力平衡计划外负荷, 对负荷的变化跟踪质量不高^[18]。为此, 基于现有 AGC 框架, 将具有快速响应能力的 PEVs 和可控负荷纳入其中, 为 AGC 提供调节容量, 如图 1 所示^[19]。其区域控制误差

(Area Control Error, ACE)由式(2)给定。

$$ACE = B \cdot \Delta f + \sum_k \Delta P_{Tk} \quad (2)$$

式中: ACE 表示 AGC 控制区域的控制区域误差; ΔP_{Tk} 表示 AGC 控制区域的第 k 条联络线功率偏差; Δf 表示系统频率偏差; B 表示 AGC 控制区域的频率偏差系数。

在现有 AGC 功能框图中, 增加一个 AGC 负荷分配器。其功能是根据 MPC 算法分配调节功率到常规机组和 PEVs。分配给常规机组的调节功率由现有的机组 AGC 控制回路实现。PEVs 由聚合器管理和控制。聚合器作为一个智能控制系统, 负责形成 PEVs 和可控负荷的聚合, 并根据来自 MPC 负荷分配器的调节功率, 控制 PEVs 和可控负荷聚合器的输出^[20-24]。

分段仿射系统(Piecewise Affine, PWA)模型是线性系统模型最简单的扩展, 能够以任意精度逼近非线性系统^[25-26]。

因此, 基于上述考虑, 建立如图 1 所示 AGC 控制区域的 PWA 模型如式(3)所示^[17,26-28]。

$$\begin{cases} \Delta P_{t+1}^{\text{pev}} = f_{\text{PWA}}^{\text{pev}}(\Delta P_t^{\text{pev}}, AGC_t^{\text{pev}}) \\ \Delta P_{t+1}^{\text{cg}} = f_{\text{PWA}}^{\text{cg}}(\Delta P_t^{\text{cg}}, AGC_t^{\text{cg}}) \\ \Delta ACE_t = \Delta P_{t+1}^{\text{pev}} + \Delta P_{t+1}^{\text{cg}} - ACE_t^{\text{ref}} \\ (AGC_t^{\text{pev}}, AGC_t^{\text{cg}}) = f_{\text{AD}}(\Delta P_{t+1}^{\text{pev}}, \Delta P_{t+1}^{\text{cg}}, ACE_t^{\text{ref}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔP_t 表示在 t 时刻常规电源和聚合器的输出功率增量; ACE_t^{ref} 表示 t 时刻系统的区域控制误差; AGC_t 表示在 t 时刻的常规电源和聚合器的 AGC 信号; ΔACE_t 表示 t 时刻的 AGC 跟踪误差; f_{PWA} 表示 PWA 函数; f_{AD} 表示基于 MPC 的 AGC 分配器的状态反馈控制函数。

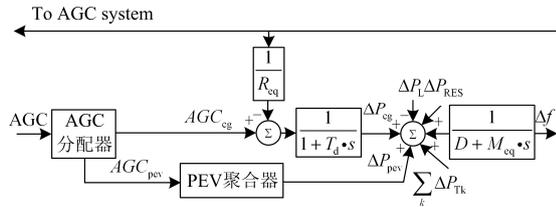


图 1 集成 PEVs 的 AGC 控制区域的模型框图

Fig. 1 Block diagram of AGC control area model integrating PEVs

2 AGC 控制区域中模型的约束

本节对所有纳入系统的模型约束进行定性描述。

假定 PEV 聚合器能够聚合足够数量的 PEVs 提供调节功率, 且这些 PEVs 存储的电能可以满足 AGC 的能量控制要求, 即这些 PEVs 的荷电状态

(State of Charge, SOC)在参与调节的过程中不会超过其 SOC 的限值^[24]。

因此当研究的主要目标放在常规机组和 PEV 聚合器的动态协调控制方面时, 模型的约束主要考虑它们的调节容量、出力变化速率和 AGC 的执行周期。

1) 常规机组的约束

(1) $P_{\text{Max}}^{\text{cg}}$: 常规机组的调节容量上限值, 硬约束。

(2) $P_{\text{Min}}^{\text{cg}}$: 常规机组的调节容量下限值, 硬约束。

(3) $u_{\text{max}}^{\text{cg}}$: 常规机组出力变化速率的上限值, 硬约束。

(4) $u_{\text{min}}^{\text{cg}}$: 常规机组出力变化速率的下限值, 硬约束。

(5) T_G : 常规机组的 AGC 执行周期, 软约束。

2) PEV 聚合器的约束

(1) $P_{\text{Max}}^{\text{pev}}$: PEVs 提供的调节容量上限值, 硬约束。

(2) $P_{\text{Min}}^{\text{pev}}$: PEVs 提供的调节容量下限值, 硬约束。

(3) T_B : PEVs 的 AGC 执行周期, 软约束。

3 带约束的 AGC 控制区域模型

如果常规机组满足出力变化速率约束, 常规机组的稳态输出功率增量与控制信号成正比^[20]。本文假定比例系数为 1, 则有式(4)。

$$\Delta P_t^{\text{cg}} = AGC_t^{\text{cg}} \quad (4)$$

在相邻的 AGC 执行周期 k 和 $k+1$, 则可得

$$\Delta P_{k+1}^{\text{cg}} = \Delta P_k^{\text{cg}} + AGC_k^{\text{cg}} \quad (5)$$

在调频期间, 等值机组的输出功率增量受到其调频容量的约束, 即

$$P_{\text{min}}^{\text{cg}} \leq \Delta P_k^{\text{cg}} \leq P_{\text{max}}^{\text{cg}} \quad (6)$$

此外, 控制信号也要被限制在常规机组的出力变化限值内。

$$u_{\text{min}}^{\text{cg}} \leq AGC_k^{\text{cg}} \leq u_{\text{max}}^{\text{cg}} \quad (7)$$

插电式电动汽车作为储能单元具有快速响应能力。和常规机组相比, PEVs 电池的出力变化速度极快, 能在极短时间内达到电池的额定充/放电功率, 因此聚合器的 AGC 模型无需像常规机组一样进行出力变化速率的校验。

由于在选择变流器时会考虑它们与 PEVs 电池参数的匹配, 本文假定 AGC_t^{pev} 已然满足变流器的功率和电流约束, 因此有式(8)^[14]。

$$\Delta P_t^{\text{pev}} = AGC_t^{\text{pev}} \quad (8)$$

式中, ΔP_t^{pev} 表示 PEVs 电池的输出功率增量。

从而在相邻的 AGC 执行周期 k 和 $k+1$, 可得式(9)。

$$\Delta P_{k+1}^{\text{pev}} = \Delta P_k^{\text{pev}} + AGC_k^{\text{pev}} \quad (9)$$

其中, ΔP_k^{pev} 在调频期间需要满足式(10)。

$$P_{\min}^{\text{pev}} \leq \Delta P_k^{\text{pev}} \leq P_{\max}^{\text{pev}} \quad (10)$$

为了保证 AGC 系统的稳定和良好性能, 常规机组和聚合器需要合适的 AGC 执行周期。为此, 常规机组和 PEVs 需要在 AGC 执行周期的约束下, 响应控制信号的切换, 实现不同控制变量的顺序调节, 其 PWA 函数表达如式(11)。

$$f_{\text{PWA}}(\Delta P_t, AGC_t) = \begin{cases} \Delta P_t + AGC_t, & t \bmod T_{\text{AGC}} = 0 \\ \Delta P_t, & t \bmod T_{\text{AGC}} \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

利用上面的约束参数和式(5)可以进一步改写式(4)描述的模型状态方程, 有

$$f_{\text{PWA}}(\Delta P_t^{\text{cg}}, AGC_t^{\text{cg}}) = \begin{cases} \Delta P_t^{\text{cg}} + AGC_t^{\text{cg}}, & t \bmod T_{\text{AGC}}^{\text{cg}} = 0 \\ \Delta P_t^{\text{cg}}, & t \bmod T_{\text{AGC}}^{\text{cg}} \neq 0 \end{cases}$$

$$f_{\text{PWA}}(\Delta P_t^{\text{pev}}, AGC_t^{\text{pev}}) = \begin{cases} \Delta P_t^{\text{pev}} + AGC_t^{\text{pev}}, & t \bmod T_{\text{AGC}}^{\text{pev}} = 0 \\ \Delta P_t^{\text{pev}}, & t \bmod T_{\text{AGC}}^{\text{pev}} \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

4 基于 MPC 的 AGC 分配器

4.1 MPC 原理

MPC 是一种被广泛接受的控制方法, 结合了优化和预测控制的特点。MPC 根据一个给定模型的系统状态 $x(k)$, 在有限的预测时域 $[k, k+N \cdot k]$ 内, 在每个采样步长 k , 对具有约束的限时最优控制 (Constrained Finite-time Optimal Control, CFTOC) 问题迭代求解。在每一次迭代中, 只有第一步的控制输出 $u(k)$ 被实现, 然后这样的优化在新的系统状态 $x(k+1)$ 被重复进行。

4.2 基于 MPC 的 AGC 分配器

基于 MPC 的 AGC 分配器可以方便地提供不同时间尺度的动态和更新率, 调度来自常规机组和 PEVs 的调节功率, 能够实现更好的系统优化控制性能, 最大限度地减少供需失衡^[29-31]。

AGC 分配器在每一个时间步长 t , 对于给定的有限预测域 N , 求解以下规划问题:

$$\text{Min } F = \begin{cases} \sum_{i=0}^N R \|\Delta P_i^{\text{pev}} + \Delta P_i^{\text{cg}} - ACE_i^{\text{ref}}\|_2^2 + \\ \sum_{i=0}^N C_1 \|AGC_i^{\text{pev}}\|_1 + C_2 \|AGC_i^{\text{cg}}\|_1 \end{cases} \quad (13)$$

上式需要满足如下等式约束(14)和不等式约束(15)。

$$\Delta P_{i+1}^{\text{pev}} = f_{\text{PWA}}^{\text{pev}}(\Delta P_i^{\text{pev}}, AGC_i^{\text{pev}})$$

$$\Delta P_{i+1}^{\text{cg}} = f_{\text{PWA}}^{\text{cg}}(\Delta P_i^{\text{cg}}, AGC_i^{\text{cg}})$$

$$ACE_0^{\text{ref}} = ACE_i^{\text{ref}} \quad \Delta P_0^{\text{pev}} = \Delta P_i^{\text{pev}} \quad (14)$$

$$\Delta P_0^{\text{cg}} = \Delta P_i^{\text{cg}}$$

$$i = 0, 1, \dots, N-1$$

$$P_{\min}^{\text{pev}} \leq \Delta P_i^{\text{pev}} \leq P_{\max}^{\text{pev}}, \quad i = 0, 1, \dots, N$$

$$P_{\min}^{\text{cg}} \leq \Delta P_i^{\text{cg}} \leq P_{\max}^{\text{cg}}, \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (15)$$

$$u_{\min}^{\text{cg}} \leq AGC_i^{\text{cg}} \leq u_{\max}^{\text{cg}}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1$$

式中: x^{pev} 、 x^{cg} 、 u^{pev} 、 u^{cg} 是变量; AGC_t 、 x_t^{pev} 、 x_t^{cg} 是时间步长 t 时的初始状态。

5 仿真

5.1 仿真模型及参数

假定在仿真系统中有 30 000 辆 PEVs 被聚合器管理和控制, 其中 60% 可以随时提供调频服务。为简化计算, 只采用一种型号的 PEVs, 即比亚迪 e6。比亚迪 e6 的电池额定功率为 78 kWh, 假定 SOC 上下限分别为 90% 和 10%, 充放电额定功率 10 kW。电池的充放电效率取 1, 初始 SOC 为 50%, 电池的 POP 取其最大和最小备用调节容量的中间值。

仿真系统中的可再生能源考虑风电, 假定区域内风电的装机容量渗透率为 34%, 仿真日预测出力与实际出力偏差近似于正态分布, 最大偏差为 180 MW。风电和负荷的模型借鉴了文献[32]给出的模型。

等值机组惯性常数 $M=10$ s, 阻尼常数 $D=1.6$, $R_{\text{eq}}=5\%$ 。输出标幺值 $P_N^{\text{cg}}=8$ 、 $P_{\text{Max}}^{\text{cg}}=8.8$ 、 $P_{\text{Min}}^{\text{cg}}=7.2$ 。

5.2 仿真结果

提出 4 个仿真实例, 其主要参数见表 1。第 1 例研究只有常规机组参与控制的输出和频率偏差, 该实例基于现有 AGC 控制框架。第 2、3 和第 4 例主要研究了常规机组与聚合器在相同的备用调节容量和出力变化速度, 不同 AGC 信号执行周期的情况下, 协调控制的输出和频率偏差, 这 3 种实例基于集成 PEVs 的 AGC 控制。

表 1 仿真实例的主要参数

Table 1 Main parameters of the simulation example

仿真实例	常规机组	常规机组	常规机组 T_G/s	PEVs 聚合器	PEVs 聚合器
	$\Delta P_i^{\text{cg}} /$ p.u.	$AGC_i^{\text{cg}} /$ p.u.		$\Delta P_i^{\text{pev}} /$ p.u.	T_B / s
1	-0.8~0.8	-0.5~0.5	8	0	0
2	-0.8~0.8	-0.5~0.5	8	-1.5~1.5	16
3	-0.8~0.8	-0.5~0.5	4	-1.5~1.5	8
4	-0.8~0.8	-0.5~0.5	4	-1.5~1.5	4

仿真使用了 5 个小时的 ACE 数据来评估聚合器参与 ACE 优化分配对高风电渗透区域中 AGC 性能的影响。图 2—图 6 中的 ACE 是前 960 s 的数据。所有的仿真都在 Matlab7.1 中实现, MPC 优化问题使用 TOMLAB/CPLEX 求解。

实例 1 的输出和频率偏差如图 2 所示。超出许可频率偏差 ± 0.2 Hz 的数据有 426 个, 最大频率负偏差为 -0.537 , 最大频率正偏差为 0.534 。显然, 实例 1 的频率偏差范围和不合格数据量都很大。

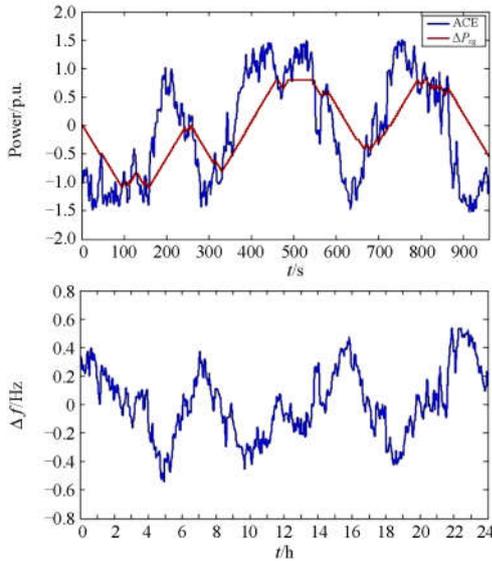


图 2 实例 1 中只有常规机组参与控制的输出和频率偏差

Fig. 2 Output and frequency deviation of control of only generators in example 1

实例 2 的输出和频率偏差如图 3 所示。超出许可频率偏差的数据有 57 个(只计及 PEVs 参与调频后的频率超差数, 下同), 最大频率负偏差为 -0.280 , 最大频率正偏差为 0.411 。和实例 1 相比, 实例 2 增加聚合器参与调频后, 即使聚合器执行周期比较大, 但和实例 1 相比, 超差频率数据降低了 87%, 说明通过 MPC 协调控制常规机组和 PEVs 参与频率调整服务, 能够显著减少频率超差, 使频率偏差范围收窄明显。

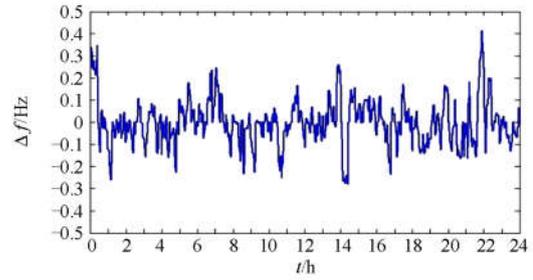
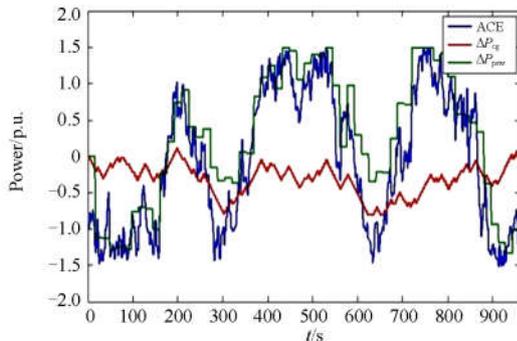


图 3 实例 2 中 PEVs 和常规机组协调控制的输出和频率偏差

Fig. 3 Output and frequency deviation of coordinated control of PEVs and generators in example 2

在图 4 中, 实例 3 超出许可频率偏差的数据共有 12 个, 频率偏差范围为 $[-0.265, 0.282]$ 。

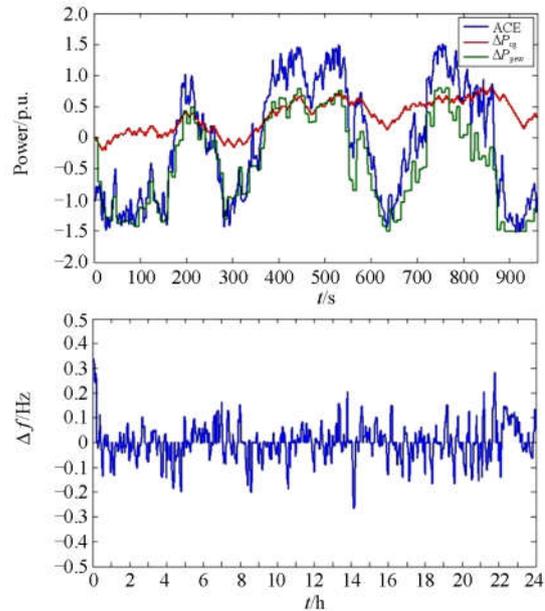


图 4 实例 3 中 PEVs 和常规机组协调控制的输出和频率偏差

Fig. 4 Output and frequency deviation of coordinated control of PEVs and generators in example 3

在图 5 中, 实例 4 超出许可频率偏差的数据为 0, 频率偏差范围为 $[-0.181, 0.201]$ 。对比实例 2、3 和 4 的数据可得: 在常规机组与聚合器其他控制要素不变的情况下, 当聚合器执行周期小到一定程度, 通过 MPC 协调控制, 可以使电力系统频率满足控制要求, 而且频率偏差范围随聚合器执行周期变小而进一步收窄并呈现对称趋势。

全部实例的频率偏差均方根见表 2。

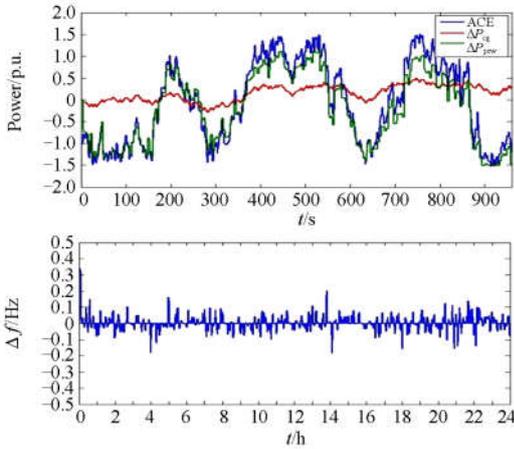


图 5 实例 4 中 PEVs 和常规机组协调控制的输出和频率偏差

Fig. 5 Output and frequency deviation of coordinated control of PEVs and generators in example 4

表 2 全部实例的频率偏差均方根

Table 2 RMS of frequency deviation of all examples

仿真实例	1	2	3	4
频率偏差均方根/Hz	0.240	0.098	0.070	0.043

表 2 数据说明基于 MPC 的常规机组与 PEVs 协调控制的频率控制效果更好，且控制效果随聚合器执行周期的变小而越来越好。

由于单车的 SOC 变化主要取决于聚合器的充/放电调度，不能代表其他 PEVs 的 SOC 变化进程。因此在仿真系统中将聚合的全部 PEVs 看成一辆车，通过它的 SOC 的变化来反映全部 PEVs 的 SOC 变化趋势。实例 2、3 和 4 中 SOC 变化如图 6 所示，这 3 个实例的 SOC 都没有超过限值。具有最小放电深度的是实例 3 中的 PEV。因此 MPC 调节功率分配器选择合适的聚合器执行周期，有助于减缓电池退化。

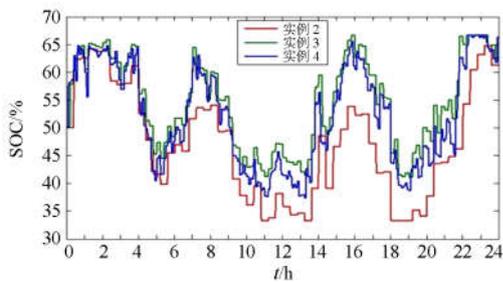


图 6 不同实例中 PEV 的 SOC

Fig. 6 SOC of PEVs in different examples

4 个仿真实例中机组和聚合器的成本因子，其设置见表 3。跟踪误差惩罚因子则一样，都是 1.1。

表 3 机组和聚合器的成本因子

Table 3 Cost factor of units and aggregator

仿真实例	机组成本因子	聚合器成本因子
1	1	1.25
2	1	1
3	1	0.8
4	0.8	0.8

4 个实例的成本见表 4。

表 4 4 个仿真实例的典型日调节成本

Table 4 Cost of four simulation cases on typical days

仿真实例	1	2	3	4
调节成本/(\$/MWh)	70 378	61 276	54 179	50 665

由表 4 可知 4 个仿真实例的成本排序，实例 3>实例 2>实例 1>实例 4。随着调节服务基础设施的完善，以及 PEVs 的快速增长。聚合器的调节成本会逐步下降，因此仿真实例 3 和 4 更满足 AGC 对性能和成本的需求。

6 结论

提出的基于 MPC 负荷分配器的控制系统模型，实现了常规机组、PEVs 和可控负荷之间的最优协调控制。仿真结果表明：提出的控制系统能充分利用可再生能源，保持功率平衡，支持 AGC 的运行；不同电源组合、不同控制输入更新率、不同备用控制容量及其变化率等控制要素都能大幅减少系统输出的波动；不同控制要素对系统频率偏差的影响是不同的，全要素的协同控制和较高的备用控制容量可以同时满足频率合格率和频率控制效果的要求；即使是全系统控制，大的控制输入更新率对于突变的大随机性波动控制的不足也很明显。

提出一个合适的控制框架实现优化控制容量及其组合，基于 MPC 的协调控制方法在电网频率控制的应用和实现，是有待进一步研究的课题。

参考文献

- [1] LIYANAGE K M, YOKOYAMA A. Ubiquity in next generation power systems and some associated Features and challenges[C] // International Symposium on Sustainable Energy, Tokyo, Japan, 2008.
- [2] KRASSUSKI M, JOCHUM P, RUFIN J, et al. Energy policy road map 2020[EB/OL]. [2009]. http://www.germany.info/contentblob/2293472/Daten/426258/Road_map_DD.pdf.
- [3] 于汀, 蒲天骄, 刘广一, 等. 电网 AGC 与 AVC 协调控

- 制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 42-47.
- YU Ding, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Coordinated control method of AGC and AVC in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 42-47.
- [4] 张磊, 罗毅, 肖雅元, 等. 大规模风电并网条件下 AGC 机组跨区分布式最优协调控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 42-49.
- ZHANG Lei, LUO Yi, XIAO Yayuan, et al. Trans-regional and distributed optimal coordination control of AGC units under large-scale wind power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 42-49.
- [5] 颜伟, 赵瑞锋, 赵霞, 等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 149-155.
- YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 149-155.
- [6] 赵川, 朱涛, 叶华. 多控制区协调自动发电控制的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 46-51.
- ZHAO Chuan, ZHU Tao, YE Hua. Research and realization of coordinated automatic generation control based on multi-control zone[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 46-51.
- [7] 李朝阳, 常喜强, 樊国威, 等. 高风电穿透下 AGC 调节备用的研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(4): 26-29.
- LI Zhaoyang, CHANG Xiqiang, FAN Guowei, et al. Study on power grid AGC standby regulation under high wind power penetration[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(4): 26-29.
- [8] 王敏, 耿照江, 茅鑫同. 考虑可再生能源出力与负荷相关性的发电系统可靠性分析[J]. 陕西电力, 2017, 45(2): 26-30.
- WANG Min, GENG Zhaojiang, MAO Xintong. Reliability analysis of power generation system considering correlations between renewable energy output and load[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(1): 26-30.
- [9] 杨天蒙. 基于状态聚类的含大规模风电电力系统调峰充裕性评估[J]. 陕西电力, 2017, 42(16): 22-26.
- YANG Tianmeng. Peak-load regulation adequacy evaluation of power system with high wind power penetration based on states clustering[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 42(16): 22-26.
- [10] PILLAI J R, BAK-JENSEN B. Impacts of electric vehicle loads on power distribution systems[C] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, 2010.
- [11] LUO Zhuowei, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Forecasting charging load of plug-in electric vehicles in China[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2011.
- [12] MAKAROV Y V, DU P, KINTNER M C W. Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 34-40.
- [13] JAYAKRISHNAN R P, MANUEL A M. Integration of vehicle-to-grid in the western Danish power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 12-19.
- [14] CHENG Y, TABRIZI M, SAHNI M, et al. Dynamic available AGC based approach for enhancing utility scale energy storage performance[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1070-1078.
- [15] CHEN Y, KEYSER M, TACKETT M H. Incorporating short-term stored energy resource into MIDWEST ISO energy and ancillary service market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 829-838.
- [16] LIYANAGE K M, YOKOYAMA A, OTA Y, et al. Coordinated control of elements in ubiquitous power networks to support load frequency control[C] // Fourth International Conference on Industrial and Information Systems, Sri Lanka, 2009.
- [17] HINDI H, GREENE D, LAVENTALL C. Coordinating regulation and demand response in electric power grids using multirate model predictive control[C] // Innovative Smart Grid Technologies, Palo Alto, CA, 2011.
- [18] ULBIG A, GALUS M D, CHATZIVASILEIADIS S, et al. General frequency control with aggregated control reserve capacity from time-varying sources: the case of PHEVs[C] // 2010 IREP Symposium—Bulk Power System Dynamics and Control, Buzios, Brazil, 2010.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [20] 杨冠成. 电力系统自动装置原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [21] 赵旋宇, 李鹏, 汪皓, 等. 新型控制性能评价方法及相应的自动发电控制模式[J]. 中国电机工程学报, 2010,

- 30(6): 93-97.
- ZHAO Xuanyu, LI Peng, WANG Hao, et al. Novel performance assessment method and corresponding AGC control model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 93-97.
- [22] GUILLE C, GROSS G. A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation[J]. Energy Policy, 2009, 37(11): 4379-4390.
- [23] XU Yixing, XIE Le, SINGH C. Optimal scheduling and operation of load aggregator with electric energy storage in power markets[C] // North American Power Symposium(NAPS), Texas, USA, 2010.
- [24] LOPES J A P, SOARES F J, ALMEIDA P M R. Integration of electric vehicles in the electric power system[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 168-183.
- [25] BROOKS A, LU E, REICHER D, et al. Demand dispatch[J]. IEEE Power & Energy Society, 2010, 8(3): 20-29.
- [26] 刘志林. 分段仿射系统的控制器设计及预测控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- LIU Zhilin. Controller design and model predictive control approaches for piecewise affine system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [27] 樊友高. 饱和切换系统的分析与综合[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- FAN Yougao. Analysis and synthesis of switched systems with actuator saturation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [28] HAN Xiaoqing, CHENG Yushu, WU Zhong, et al. Research on frequency regulation of power system containing wind farm[C] // IEEE Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Singapore, 2010.
- [29] 邹涛, 丁宝苍, 张端. 模型预测控制工程应用导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [30] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [31] RAO C V, MAYNE D Q, RAWLINGS J B, et al. Constrained model predictive control: stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [32] TAKAGI M, YAMAJI K, YAMAMOTO H. Power system stabilization by charging power management of plug-in hybrid electric vehicles with LFC signal[C] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Tokyo, Japan, 2009.
-
- 收稿日期: 2016-12-17; 修回日期: 2017-05-08
- 作者简介:
- 侯贺军(1971—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电动汽车、智能监控技术与电力系统稳定控制; E-mail: houmaojun@sina.com
- 罗春辉(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为含可再生能源的大电网安全性评估与智能优化调度、智能配电系统风险分析与运行优化; E-mail: chlue@hnu.edu.cn
- 武学伟(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划。E-mail: 312565299@qq.com
- (编辑 张爱琴)