

基于模糊分数阶PID的含电动汽车的多能源 微电网二次频率控制

项雷军, 陈 昊, 郭新华, 杨一凡

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:为了解决分布式可再生能源间歇性发电和电动汽车接入微电网导致的微电网频率波动问题,针对含电动汽车接入的多能源微电网系统,设计了一种基于模糊自适应理论的分阶比例-积分-微分(PID)二次频率控制器,通过建立模糊控制规则,结合频率偏差对模糊分阶PID控制器参数进行实时在线整定。考虑光伏发电和风力发电输出功率波动、电动汽车接入微电网、随机负荷扰动3种不同场景,对所提出的模糊分阶PID控制方法进行了仿真验证与量化分析。仿真结果表明,相比于传统PID控制器和分阶PID控制器,所设计的模糊分阶PID控制器使得系统频率响应振荡减少、超调量明显降低、动态调节时间更短,呈现出更强的抗扰动能力和鲁棒性,对于多能源微电网的二次频率调节具有优良的控制效果。

关键词:微电网;电动汽车;二次频率控制;模糊分阶PID;参数整定

中图分类号:TM 761;U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108034

0 引言

由于分布式新能源和储能设施具有供电灵活、对环境无污染、能源利用率高等优点,且分布式新能源与分布式储能设施优势互补,近年来由可再生能源发电装置、电动汽车(EV)储能、燃料电池、飞轮储能等结合构成的微电网系统正日益受到行业广泛关注,逐步被推广应用于电力需求响应,以满足不同区域多样化的能源需求。微电网运行在孤岛模式下,缺乏大电网的支撑,依靠微能源和储能单元共同维持系统频率和电压稳定^[1]。分布式可再生能源发电的间歇性特点和电动汽车入网数量的不断增多,势必导致微电网系统频率产生较大波动,给微电网的稳定运行带来不利影响^[2]。

随着电动汽车的应用不断推广,文献[3-6]考虑电动汽车与电网的互动影响,针对电动汽车作为储能电源或可控负荷,建立了电动汽车接入互联电网的负荷频率控制模型,并运用分散式比例积分(PI)控制方法及协调优化策略进行二次调频,通过不同情况下的系统仿真,表明了电动汽车参与电网调频能有效提高电网频率的稳定性,但控制器参数基本靠经验试凑法整定,不一定能获得最佳控制性能。上述公开报道的成果基本是围绕电动汽车接入常规互联电网的负荷频率控制问题来展开研究的,而针对多样化分布式微能源和电动汽车同时接入微电网的系统二次频率控制研究成果相对较少。文献[7]将虚拟同步机控制技术应用用于电动汽车接入微电网的

系统一次、二次调频,实现了独立模式下微电网频率的无差调节;文献[8-9]研究了含电动汽车的孤岛微电网负荷频率控制问题,考虑电动汽车作为微储能单元的调频特性,采用预测控制方法实现系统频率波动的快速消除,提高了微电网系统频率稳定性,但所采用的预测控制方法计算量过大,实现相对复杂。

现有的控制方法由于存在控制器设计过程复杂或参数不易整定等原因,控制效果不佳,基本不能满足含电动汽车和多种微型分布式能源接入的复杂微电网系统的频率稳定运行,需研究更先进和简便有效的微电网频率控制方法,以减少分布式能源有功出力的强波动性和电动汽车充电对微电网电能质量的影响,提升孤岛微电网系统运行的频率稳定性。分阶比例-积分-微分(PID)控制器将近年快速发展的分阶理论与传统PID控制器相结合,拓宽了控制参数的可调范围,在保持控制器简单灵活易实现的基础上,相比传统PID控制器具有更优的动态性能和鲁棒性。如:文献[10]使用分阶PID控制器控制永磁同步电机驱动的交流伺服系统,有效抑制了伺服系统的位置扰动;文献[11]针对开关磁阻电机调速系统中的转速突变和负载突变问题,设计了最优分阶PID控制器,验证了分阶PID控制器相比于经典控制器具有更快的响应速度和更优的控制性能。同时,模糊自适应理论凭借其实现简单、灵活、智能化的特点,可实时辨识频率偏差量状态,并能在线自适应整定控制器参数,相比于其他算法,更适用于整定微电网二次频率控制器参数。因此,将分阶PID控制器与模糊自适应理论相结合,设计出模糊自适应分阶PID控制器,应用于含电动汽车接入的多能源微电网稳定运行的二次频率控制

收稿日期:2020-12-06;修回日期:2021-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477058)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477058)

问题,具有显著优势。

本文围绕多种分布式可再生能源和电动汽车同时接入微电网而引发的系统频率波动问题展开研究,建立了电动汽车换电站和分布式多能源同时接入微电网的综合系统模型,针对孤岛综合微电网系统的二次调频,设计了分数阶PID二次频率控制器,并选用模糊自适应理论对系统二次频率分数阶PID控制器的可调参数进行在线整定。考虑光伏(PV)电源和风力(WTG)电源有功出力的随机性和波动性、不同数量及荷电状态(SOC)的电动汽车接入微电网以及随机负荷扰动3种不同场景,通过将本文所采用的模糊分数阶PID控制器与传统PID控制器、分数阶PID控制器进行仿真对比,验证了上述3种不同场景对微电网系统二次频率波动的影响以及所提出的模糊分数阶PID控制效果。研究结果表明,模糊分数阶PID控制器相比于传统PID控制器、分数阶PID控制器,在减少振荡、削减超调量、缩短调节时间上具有更优越的控制性能,对微电网二次频率的控制效果更加明显。同时也验证了电动汽车作为储能单元更有利于多能源微电网的二次调频。

1 含电动汽车的孤岛微电网频率控制模型

1.1 孤岛微电网频率控制模型

微电网是一种由微能源和负荷组成的小型电力系统,本文研究的孤岛微电网主要由光伏电源、风力电源、燃料电池(FC)、飞轮储能系统(FESS)、电池储能系统(BESS)、柴油发电机组(DEG)以及电动汽车换电站组成,示意图如图1所示。图中, K_a 为增益系数,负责控制风电的入网功率,不考虑丢电的情况时取值为1; P_{PV} 、 P_{WTG} 、 P_{FC} 为各电源输出功率; P_{BESS} 、 P_{FESS} 为各储能系统输出功率; P_{DEG} 为柴油发电机组输出功率; P_{EV} 为电动汽车换电站输出功率; P_{Load} 为最终流向用户负荷侧的功率。

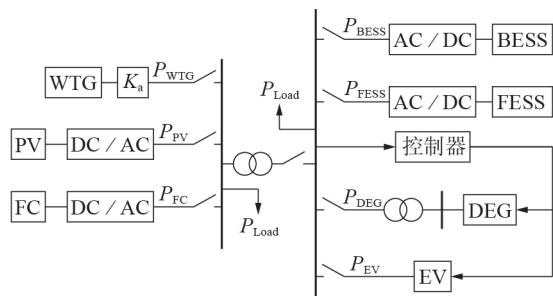


图1 多能源微电网系统组成示意图

Fig.1 System composition diagram of multi-energy microgrid

含电动汽车的多能源微电网系统频率控制模型如图2所示。图中, T_{in} 、 T_{ic} 分别为逆变器和互联器件的时间常数^[12]; T_{pv} 、 T_{WTG} 、 T_{FC} 为各电源时间常数; T_{FESS} 、 T_{RFSS} 为各储能系统时间常数; T_c 、 T_i 分别为柴油

发电机组调速器、汽轮机时间常数; D 为负荷阻尼系数; $2H$ 为发电机惯性常数; R 为调差系数; Δf 为频率偏差; ΔP_L 为负荷扰动。

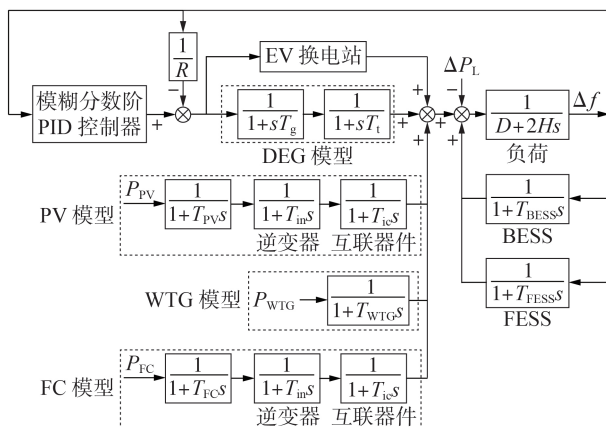


图2 含电动汽车的多能源微电网频率控制框图

Fig.2 Block diagram of frequency control for multi-energy microgrid with EVs

1.2 电动汽车换电站能量控制模型

随着新能源汽车的广泛应用,电动汽车作为一种可入网的新型可控负荷,在停驶状态下可以通过蓄电池放电向电网输送能量,实现能量在电动汽车和微电网之间的双向流通^[13]。电动汽车换电站是微电网的重要组成部分,其能量等效模型框图如附录A图A1所示^[14],输入量为微电网的电压偏差 ΔU_E ,设置逆变器容量约束 $\pm \mu_e$ 和功率增量变化率约束 $\pm \delta_e$ 。这2个约束环节,以限制电动汽车的充放电功率大小。

电动汽车参与频率控制主要是通过电动汽车换电站接受负荷调度中心的负荷频率控制(LFC)信号,分配给换电站中受控的电动汽车,采取合适的充放电行为来实现。图 A1 中的总能量模型(TEM)代表电动汽车换电站可以被用来调频的可控能量总和^[12,14]。可控总能量的计算公式如式(1)所示,总能量约束如式(2)所示。

$$E_{\text{control}} = -E_{\text{IEC}} + E_{\text{in}} + E_0 - E_{\text{out}} \quad (1)$$

$$E_{\text{control}}^{\min} < E_{\text{control}} < E_{\text{control}}^{\max} \quad (2)$$

式中: E_{control} 为换电站中受控电动汽车的总能量; E_{LFC} 为LFC信号的能量响应; E_{in} 为可控能量的增加量; E_0 为初始总能量; E_{out} 为因电动汽车拔电离开而损失的受控能量,如式(3)所示; $E_{\text{control}}^{\text{max}}$ 和 $E_{\text{control}}^{\text{min}}$ 分别为能量限制的上、下限。

$$E_{\text{out}} = \frac{Z}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (3)$$

式中: E_i 为第 i 辆电动汽车的能量; N 为换电站的电动汽车总数; Z 为拔电离开的电动汽车数量。

假定拨电离开的电动汽车的能量为受控电动汽车的平均能量, 则 $N=N_{\text{control}}$ (N_{control} 为受控电动汽车的全部数量), $\sum_{i=1}^N E_i = E_{\text{control}}$ 。拨电离开的电动汽车数量

等于拔电速率 R_{out} 的积分,则式(3)可以改写为:

$$E_{out} = \frac{\int R_{out} dt}{N_{control}} E_{control} \quad (4)$$

这样,总能量模型的输出即为受控电动汽车储存电能的总和。受控电动汽车储存电能的总和占总能量的百分比即为电动汽车的荷电状态,根据电动汽车的荷电状态信息来控制单辆汽车的充放电行为,使受控电动汽车的总体荷电状态保持在80%左右^[15]。在车网互动(V2G)模式下,某时段内电动汽车的充放电功率可表示为:

$$P_{E,i}(k) = \mu_e p_{E,i}(k) f_i(k) \quad (5)$$

$$f_i(k) = \begin{cases} 1 & E_{EV} > E_{max} \\ 0 & E_{min} \leq E_{EV} \leq E_{max} \\ -1 & E_{EV} < E_{min} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{E,i}(k)$ 为 k 时刻第 i 辆电动汽车优化后的功率,具备连续可调的特性; μ_e 为逆变器容量约束; $p_{E,i}(k)$ 为 k 时刻第 i 辆电动汽车与微电网之间的交换功率; $f_i(k)$ 为 k 时刻第 i 辆电动汽车的充放电状态; E_{max} 、 E_{min} 分别为容量上、下限。当电池能量低于容量下限时,受控电动汽车处于充电状态;当电池能量高于容量上限时,电动汽车处于放电状态;同时,提前设置好的约束环节确保电动汽车的放电速率不超过 μ_e ,充电速率不低于 μ_e 。

2 模糊分数阶PID二次频率控制器设计

2.1 分数阶PID控制原理

分数阶微积分实质上是非整数阶微积分,分数阶定义在不同的角度有不同的表现形式,这里引入一个统一的分数阶微分、积分的算子^[11]。

$${}_a D_t^\gamma = \begin{cases} d^\gamma/dt^\gamma & \gamma > 0 \\ 1 & \gamma = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\gamma} & \gamma < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: D 为分数阶算子; t 为自变量; a 为 t 的下边界; γ 为分数阶算子的阶次且 $\gamma \in \mathbf{R}$ 。

但是分数阶作为一个非线性系统,在实际的模拟仿真中,并不存在一个整数阶传递函数模型来完成真正的分数阶行为,而是一般通过离散化、近似化来实现分数阶系统。相关的拟合方法有很多,大部分分数阶模型采用Oustaloup算法拟合。

Oustaloup分数阶算子实现方法是在频域上用一零极点形式传递函数来近似描述一个分数阶算子。Oustaloup滤波器的标准形式为:

$$s^\gamma \approx G(s) = K \prod_{k=1}^{N_f} \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (8)$$

式中: N_f 为滤波器的阶次;零点 $\omega'_k = \omega_b \omega_u^{\frac{2k-1-\gamma}{N_f}}$, $\omega_u =$

$\sqrt{\omega_h/\omega_b}$, ω_b 、 ω_h 分别为设计者选择的频率段的下限与上限;极点 $\omega_k = \omega_b \omega_u^{\frac{2k-1+\gamma}{N_f}}$;增益 $K = \omega_h^\gamma$ 。

Oustaloup改进算法将分数阶微分算子用分数阶传递函数近似^[16]以提升算法的近似精度,即:

$$K(s) = \left\{ \left[1 + \frac{s}{(d/b)\omega_b} \right] / \left[1 + \frac{s}{(b/d)\omega_h} \right] \right\}^\alpha \quad (9)$$

式中: $0 < \alpha < 1$; $s = j\omega$; $b > 0$; $d > 0$ 。

在 $\omega_b < \omega < \omega_h$ 频率段内,将式(8)进行泰勒级数展开,取一阶近似后得到:

$$s^\alpha \approx \left(\frac{d\omega_h}{b} \right)^\alpha \frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-\alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha} \prod_{k=-N_f}^{N_f} \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (10)$$

比较式(8)和式(10)可以看出,改进的算法是在Oustaloup算法的基础上,将增益 $K(s)$ 进行泰勒级数展开并取一阶近似,相当于增加了一个前置滤波器,提升了曲线的拟合精度。

本文取参数 $b=10$, $d=9$, $N_f=11$, $\omega_b=10^{-4}$ rad/s, $\omega_h=10^4$ rad/s。

典型的分数阶PID控制器数学表达式为:

$$C(s) = K_p + K_i/s^\lambda + K_d s^\mu \quad (11)$$

式中: K_p 、 K_i 和 K_d 分别为比例项、积分项和微分项系数; λ 和 μ 分别为控制器积分项和微分项的权重。分数阶PID控制器有5个参数可以自由调节,相较于传统PID控制器多2个参数,在参与系统二次频率调节时效果会更好。

本文所设计的模糊分数阶PID二次频率控制器包括模糊控制规则模块和分数阶PID控制器模块,是将模糊控制规则模块的输出量作为分数阶PID控制器参数的调节变化量。每次接收到微电网系统中频率偏差及其变化率的采样数据,模糊控制规则模块都会做出及时的调整,并调节分数阶PID控制器的相关参数。多能源微电网系统中,所设计的模糊分数阶PID二次频率控制器结构如图3所示。图中, $E(s)$ 为将频率偏差 Δf 转换成 s 域下控制器的输入量; E_c 为频率偏差变化率; $U(s)$ 为控制器的输出量; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 、 $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \mu$ 为控制器参数的修正值。

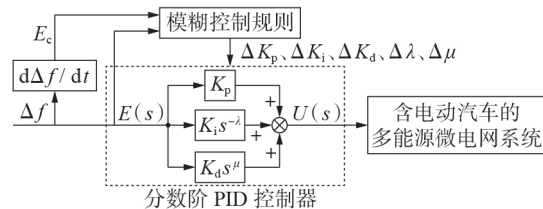


图3 模糊分数阶PID二次频率控制器结构图

Fig.3 Structure diagram of fuzzy fractional-order PID controller for secondary frequency

2.2 基于模糊自适应的控制器参数整定

模糊算法不需要被控系统准确的模型,根据自

身设定好的模糊集对系统变化做出反应,采用模糊自适应算法在线整定分数阶PID控制器的参数,相比于传统PID控制器,其动态响应速度、鲁棒控制性能都有较大提升,控制参数调节灵活,应用范围更广。

模糊控制规则的论域为 $\{-6, -4.5, -3, 0, 3, 4.5, 6\}$,语言变量为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$,对应 $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$,选用的隶属度函数为三角形函数,如附录B图B1—B5所示。模糊规则库是设计者根据自身经验建立的模糊控制规则表^[17-18],如附录B表B1—B5所示。模糊控制规则的输入为 E 和 E_c ,输出为分数阶PID控制器的5个参数。根据隶属度函数计算的结果判断 E 和 E_c 属于语言集合的哪一个区间,经规则表推理得到输出量的模糊集,采用均值判决法解模糊化,将语言变量转变为对应的数值集合,解模糊化得到调节量的准确值,从而得到 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 、 $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \mu$,代入式(12)中,实时修正分数阶PID控制器的参数。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \\ \lambda = \lambda_0 + \Delta \lambda \\ \mu = \mu_0 + \Delta \mu \end{cases} \quad (12)$$

式中: K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 、 λ_0 、 μ_0 为分数阶PID控制器的可调参数初始取值。

3 系统控制仿真结果及分析

本节利用上述设计的基于模糊自适应理论的分数阶PID控制器,对含电动汽车的多能源微电网系统模型进行了仿真研究。微电网模型中光伏电源、风力电源、燃料电池、飞轮储能系统、电池储能系统、柴油发电机组等的相关参数如附录C表C1所示,附录C表C2为控制器参数。

系统控制仿真中,为了验证本文所设计的模糊分数阶PID控制器在多能源微电网二次频率控制中的优越性,分别考虑了光伏电源和风力电源输出功率波动、不同数量及荷电状态的电动汽车接入微电网、随机负荷扰动3种场景,在同等条件下,将所设计的模糊分数阶PID控制器与传统PID控制器、分数阶PID控制器的仿真控制效果进行了对比,并对不同控制器的性能指标进行了量化分析与比较。

3.1 可再生能源输出功率波动场景下性能验证

由于光伏电源输出功率受到太阳光辐射强度约束,风力电源输出功率受到风速的限制,同时太阳光辐射强度、风速又处于动态变化中,势必造成可再生能源有功出力的随机性波动,对微电网稳定运行造成不利影响。考虑如图4所示的光伏电源和风力电源的输出功率波动(标幺值),光伏电源的输出功率

波形为正态分布,风力电源的输出功率波动具有随机性(曲线数据来源于Meteonorm软件的气象数据库,采样地点是中国威海市)。

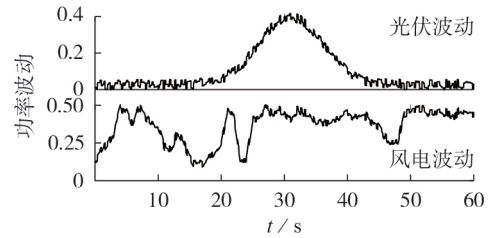


图4 可再生能源输出功率波动

Fig.4 Output power fluctuations of renewable energies

在多能源微电网二次频率控制系统中,分别采用传统PID控制器、分数阶PID控制器、模糊分数阶PID控制器进行控制仿真,控制结果如图5所示。

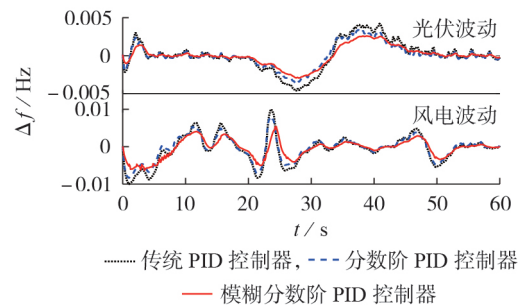


图5 不同波动情况下的频率偏差响应

Fig.5 Frequency deviation response under different fluctuations

从图5中可以看出,本文设计的模糊分数阶PID控制器有效抑制了光伏发电和风力发电引起的频率波动,并且相对于传统PID控制器和分数阶PID控制器具有更好的控制性能,在二次频率控制中,频率扰动范围更小,响应调节时间更短。

控制器的控制性能还可通过时间与误差绝对值积分(ITAE)来量化分析^[19],不同控制器的ITAE值比较如表1所示。相较于传统PID控制器、分数阶PID控制器,本文设计的模糊分数阶PID控制器在光伏波动情况下的ITAE值分别减小了35%和15%,在风电波动情况下的ITAE值分别减小了37%和25%。这从定量角度证明了模糊分数阶PID控制器的响应更快,调节效果更显著。

表1 不同波动情况下不同控制器的ITAE值

Table 1 ITAE values of different controllers under different fluctuations

波动情况	ITAE值		
	传统PID 控制器	分数阶PID 控制器	模糊分数阶 PID控制器
光伏波动	2.548	1.930	1.646
风电波动	4.112	3.458	2.579

3.2 电动汽车换电站接入微电网场景下性能验证

考虑到电动汽车接入时不同数量和荷电状态的随机性对频率偏差响应性能的影响,假设电动汽车接入时有 3 种接入情况,分别为大部分电动汽车为低荷电状态、中荷电状态、高荷电状态,如附录 C 图 C1 所示。3 种接入情况表示接入的电动汽车荷电状态随机,不同荷电状态的电动汽车数量随机。由图 C1 可知,3 种情况的主要特征为正态分布,低荷电状态接入时荷电状态为 70%,中荷电状态接入时荷电状态为 80%,高荷电状态接入时荷电状态为 95%。仿真分析时随机选取电动汽车的荷电状态,随机选取该荷电状态下电动汽车的数量。最后选取的电动汽车总数为 200 辆,其中荷电状态分布情况要符合 3 种接入情况之一的特征要求。系统发生幅值在 ± 0.1 p.u. 之间波动的随机负荷扰动,电动汽车 3 种荷电状态下的频率偏差响应如附录 C 图 C2 所示。由图可知:当大部分电动汽车的荷电状态为 95% (高荷电状态) 时,电动汽车换电站以释放电能为主,因此对负的频率偏差响应的抑制效果较好;荷电状态为 70% (低荷电状态) 时则刚好相反,电动汽车换电站此时以吸收电能为主,因此对正的频率偏差响应的抑制效果较好;而荷电状态为 80% (中荷电状态) 时,电动汽车换电站既能吸收电能,也能释放电能,对于频率偏差响应的抑制效果最为理想。

为了研究电动汽车换电站接入微电网后对系统的调频作用,假定系统发生幅值在 ± 0.1 p.u. 之间的随机负荷扰动,电动汽车接入时荷电状态主要为 80%,数量为 200 辆。分别进行有、无电动汽车换电站连接的仿真实验。另外假设电动汽车换电站中受控的电动汽车数量发生变化,数量从 50 辆到 200 辆不等,在 25 s 时发生幅值为 -0.2 p.u. 的阶跃负荷扰动。微电网系统频率偏差输出响应曲线如图 6 所示。

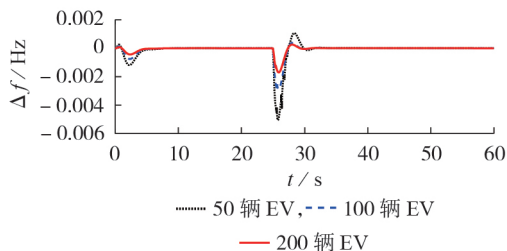
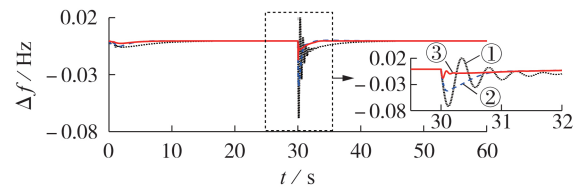


图 6 不同数量电动汽车接入微电网时频率偏差响应

Fig.6 Frequency deviation response when different numbers of EVs are connected to microgrid

由图 6 可知,电动汽车数量为 200 辆时,系统频率偏差峰值为 0.001 7 Hz,占 50 辆时频率偏差峰值的 33%,占 100 辆时的 59%。电动汽车换电站有助于改善微电网中出现的频率偏差,并且其电动汽车数量的增加能够使微电网中有充足的备用来管理负载和生成波动之间的不平衡,稳定微电网频率。

当电动汽车换电站接入并且工作在充放电模式下,在 30 s 时施加 -0.15 p.u. 的阶跃负荷扰动,电动汽车荷电状态为 80%,电动汽车数量为 200 辆。对比分析不同控制器的仿真控制效果,微电网的频率偏差响应曲线如图 7 所示。



① 传统 PID 控制器, ② 分数阶 PID 控制器
③ 模糊分数阶 PID 控制器

图 7 充放电模式下不同控制器的效果对比

Fig.7 Effect comparison among different controllers in charging and discharging modes

由图 7 可看出,当电动汽车换电站工作在充放电模式时,相较于传统 PID 控制器、分数阶 PID 控制器,模糊分数阶 PID 控制器的响应更迅速,调节时间更短,同时超调量大幅减小,能快速抑制频率波动。

同时,定量分析计算了不同控制器的性能指标,分别为误差绝对值积分 (IAE)、ITAE、误差平方积分 (ISE) 和误差平方时间积分 (ITSE),如表 2 所示。由表可知,3 种不同控制器中,传统 PID 控制器性能指标值最大,分数阶 PID 控制器次之,模糊分数阶 PID 控制器各项性能指标值均为最小。这表明模糊分数阶 PID 控制器的二次调频控制性能最佳,具有更强的抗干扰能力。

表 2 不同控制器的性能指标

Table 2 Performance indicators of different controllers

控制器	IAE 值	ITAE 值	ISE 值	ITSE 值
传统 PID	0.002 2	0.045 1	3.3×10^{-6}	8.6×10^{-5}
分数阶 PID	0.001 2	0.026 5	1.4×10^{-6}	3.7×10^{-5}
模糊分数阶 PID	0.000 6	0.007 9	7.8×10^{-8}	1.5×10^{-6}

在含电动汽车的微电网二次频率控制过程中,系统控制受到电动汽车接入数量与荷电状态的随机性影响,存在诸多不确定性因素,因此对控制器的结构设计和参数整定要求很高。与传统 PID 控制器相比,分数阶 PID 控制器除了比例、积分、微分 3 个参数外,还增加了 λ 和 μ 2 个可调参数,且控制器的阶次可任意选取,5 个参数对微电网调频系统共同作用,对系统内外部扰动有更好的适应性,具有更强的控制灵活性。故分数阶 PID 控制器比传统 PID 控制器调频控制效果好。但传统 PID 控制器和分数阶 PID 控制器的参数整定均主要依靠人为经验通过试凑方法获得,且是离线整定,不能实时适应微电网中电动汽车接入数量与荷电状态变化产生的随机扰动。而模糊分数阶 PID 控制器将模糊自适应理论与分数阶

PID控制器相结合,弥补了传统PID控制器和分数阶PID控制器的不足,通过建立模糊控制规则库对分数阶PID控制器的5个参数进行在线自整定,参数调节更灵活,微电网频率偏差输出响应的超调量大幅降低,响应速度更快,抗扰动能力更突出。通过不同场景下控制仿真分析可知,采用模糊分数阶PID控制器进行微电网二次调频,相比于传统PID控制器和分数阶PID控制器,具有更优越的动稳态性能。

3.3 随机负荷扰动场景下性能验证

假定微电网系统在20~40 s内发生幅值变化范围为 ± 0.1 p.u.的有界随机负荷扰动,将传统PID控制器、分数阶PID控制器、模糊分数阶PID控制器分别应用于含电动汽车的多能源微电网二次频率控制,同等条件下对比不同控制器作用下多能源微电网系统的二次频率动态响应性能,仿真结果如图8所示。

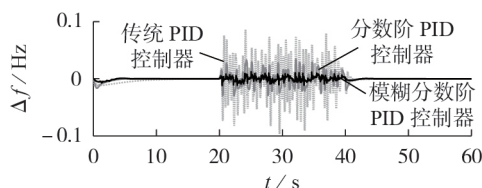


图8 随机负荷扰动下微电网频率偏差响应

Fig.8 Frequency deviation response of microgrid under random load disturbances

由图8可知,相比于传统PID控制器和分数阶PID控制器,本文设计的模糊分数阶PID控制器在快速消除微电网频率波动的同时,能够抑制峰值,缩短调节时间,对于随机负荷扰动具有更好的调节效果。仿真结果表明了模糊分数阶PID控制器在解决含电动汽车的多能源微电网二次频率控制问题上的可行性与优越性,有助于提升系统的频率稳定性能。

通过上述微电网不同场景下的仿真验证与量化分析可以看出,针对负荷扰动引起的功率偏差分配与补偿是通过反馈环节由柴油发电机组调频器起主导作用、电动汽车换电站和储能装置起辅助作用来完成的,最终实现微电网的功率平衡及频率的无差调节。虽然3种控制器均能实现微电网二次频率的无差调节,但模糊分数阶PID控制器在抗扰动、降低超调量、响应速度等方面表现出更佳的控制性能。

4 结论

本文建立了含电动汽车的多能源微电网系统模型,设计了基于模糊分数阶PID的微电网二次频率控制器,考虑了可再生能源输出功率波动、电动汽车换电站接入微电网、随机负荷扰动3种不同场景的发生对微电网频率稳定性的影响,并通过系统控制仿真及量化分析验证了所设计的微电网模糊分数阶PID二次频率控制器的有效性。获得的结论如下:

1) 本文设计的模糊分数阶PID控制器能有效抑制可再生能源间歇性发电导致的微电网频率波动,且具有良好的调频控制效果;

2) 在模糊分数阶PID控制下,电动汽车换电站的接入有利于多能源微电网二次频率的调节,且电动汽车接入微电网的数量越多,微电网系统二次频率控制效果越好;

3) 在发生随机负荷扰动的场景下,模糊分数阶PID二次频率控制器具有较为显著的扰动抑制能力;

4) 由于模糊分数阶PID控制器可利用模糊控制规则进行在线自适应参数整定,故相比于传统PID控制器和分数阶PID控制器,模糊分数阶PID控制器具有更优越的动态特性和鲁棒性能,这为模糊分数阶PID控制方法在多能源微电网调频领域的实际应用提供了理论指导与借鉴。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郭蕾,苏建徽,施永. 微网孤岛运行模式下的调频控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(8):110-115.
GUO Lei, SU Jianhui, SHI Yong. Frequency regulation control strategy for microgrid in islanded mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 110-115.
- [2] BEVRANI H. Robust power system frequency control[M]. 2nd ed. New York, USA: Springer, 2014: 5-15.
- [3] 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.
- [4] 谢平平,李银红,石东源. 计及电动汽车换电站储能的负荷频率控制[J]. 电工技术学报,2016,31(12):193-203,210.
XIE Pingping, LI Yinhong, SHI Dongyuan. Research on load frequency control considering energy storage in electric vehicle battery swapping stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 193-203, 210.
- [5] 李家壮,艾欣,胡俊杰. 电动汽车参与电网二次调频建模与控制策略[J]. 电网技术,2019,43(2):495-503.
LI Jia Zhuang, AI Xin, HU Junjie. Supplementary frequency regulation modeling and control strategy with electric vehicles[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 495-503.
- [6] 杨健维,董鸿志,廖凯,等. 计及电动汽车辅助调频的负荷频率控制联合优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):200-206.
YANG Jianwei, DONG Hongzhi, LIAO Kai, et al. Joint optimization of load frequency control considering auxiliary frequency regulation of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 200-206.
- [7] 刘其辉,逯胜建. 参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(9):171-179.
LIU Qihui, LU Shengjian. Charging and discharging control strategy based on virtual synchronous machine for electrical vehicles participating in frequency regulation of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 171-179.
- [8] JUN Y, ZENG Z, TANG Y, et al. Load frequency control in isolated micro-grids with electrical vehicles based on multi-variable generalized predictive theory[J]. Energies, 2015, 8(3):

- 2145-2164.
- [9] 马苗苗,潘军军,刘向杰. 含电动汽车的微电网模型预测负荷频率控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(5):1644-1652.
MA Miaomiao, PAN Junjun, LIU Xiangjie. Model predictive load frequency control of microgrid with electrical vehicles[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49(5):1644-1652.
- [10] 王荣林,陆宝春,侯润民,等. 交流伺服系统分数阶PID改进型自抗扰控制[J]. 中国机械工程,2019,30(16):1989-1995.
WANG Ronglin, LU Baochun, HOU Runmin, et al. FOPID improved ADRC in AC servo systems[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(16):1989-1995.
- [11] 刘勇智,李杰,鄱成龙. 开关磁阻电机最优分数阶PID μ 控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(1):105-110.
LIU Yongzhi, LI Jie, SHAN Chenglong. Design of optimal fractional-order PID μ controller for switched reluctance motor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1):105-110.
- [12] MOHAMMAD K. Secondary load frequency control of time-delay stand-alone microgrids with electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9):7416-7422.
- [13] 陈中,刘艺,陈轩,等. 考虑移动储能特性的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):77-88.
CHEN Zhong, LIU Yi, CHEN Xuan, et al. Scheduling strategy for electric vehicles considering the mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2):77-88.
- [14] KHOKHAR B, DAHIY S, SINGH P. A robust cascade controller for load frequency control of a standalone microgrid incorporating electric vehicles[J]. Electric Power Components and Systems, 2020, 48:711-726.
- [15] 占智,邹波,林振智,等. 计及可转移充放电容量裕度的电动汽车充放电实时调度策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):109-116.
ZHAN Zhi, ZOU Bo, LIN Zhenzhi, et al. Real-time dispatch strategy for charging/discharging of electric vehicles considering transferable margin of charging/discharging energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):109-116.
- [16] 齐乃明,秦昌茂,王威. 分数阶系统的最优Oustaloup数字实现算法[J]. 控制与决策,2010,25(10):1598-1600.
QI Naiming, QIN Changmao, WANG Wei. Optimal Oustaloup digital realization of fractional order systems[J]. Control and Decision, 2010, 25(10):1598-1600.
- [17] 顾祖成,耿小江,王永娟,等. 模糊自适应PID控制在无刷直流电机调速系统中的应用[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(1):39-41.
GU Zucheng, GENG Xiaojiao, WANG Yongjuan, et al. Application of fuzzy adaptive PID control in brushless DC motor speed regulation system[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(1):39-41.
- [18] BEVRANI H, HABIBI F, BABAHAYANI P, et al. Intelligent frequency control in an AC microgrid:online PSO-based fuzzy tuning approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4):1935-1944.
- [19] SHARMA J, HOTE Y V, PRASAD R. PID controller design for interval load frequency control system with communication time delay[J]. Control Engineering Practice, 2019, 89(8):154-168.

作者简介:



项雷军

项雷军(1979—),男,湖北黄冈人,讲师,硕士,通信作者,主要研究方向为新能源电力系统稳定分析与优化控制等(E-mail: ljxiang@hqu.edu.cn);

陈昊(1997—),男,山东威海人,硕士研究生,主要研究方向为微电网频率稳定分析与控制(E-mail: chen hao987654@126.com);

郭新华(1977—),男,福建三明人,教授,博士,主要研究方向为电动汽车驱动电机及其控制、动车牵引控制、船舶推进多相电机及其控制、半导体IGBT封测技术(E-mail: guoxinhua@hqu.edu.cn);

杨一凡(1996—),女,河北张家口人,硕士研究生,主要研究方向为智能电网负荷频率控制(E-mail: 18014082016@stu.hqu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Secondary frequency control of multi-energy microgrid with electric vehicles based on fuzzy fractional-order PID

XIANG Leijun, CHEN Hao, GUO Xinhua, YANG Yifan

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to solve the problems of microgrid frequency fluctuation caused by the connection of distributed intermittent renewable energy power generations and electric vehicles to microgrid, a fractional-order PID (Proportional Integral Differential) secondary frequency controller based on the fuzzy adaptive logic is designed. Through the fuzzy control rules, the parameters of the fuzzy fractional-order PID controller are set online in real time by combining with the frequency deviation. Considering three scenarios of the output power fluctuation of photovoltaic power generation and wind power generation, the connection of electric vehicles to microgrid, and the random load disturbances, the proposed fuzzy fractional-order PID control method is simulated, verified and analyzed quantitatively. Simulative results show that compared with the traditional PID controller and the fractional-order PID controller, the designed fuzzy fractional-order PID controller achieves fewer system frequency response oscillation, lower overshoot and shorter dynamic adjustment time, and shows stronger capacity of anti-disturbance and robustness, which has the excellent control effect for secondary frequency regulation of multi-energy microgrid.

Key words: microgrid; electric vehicles; secondary frequency control; fuzzy fractional-order PID; parameter setting

附录 A

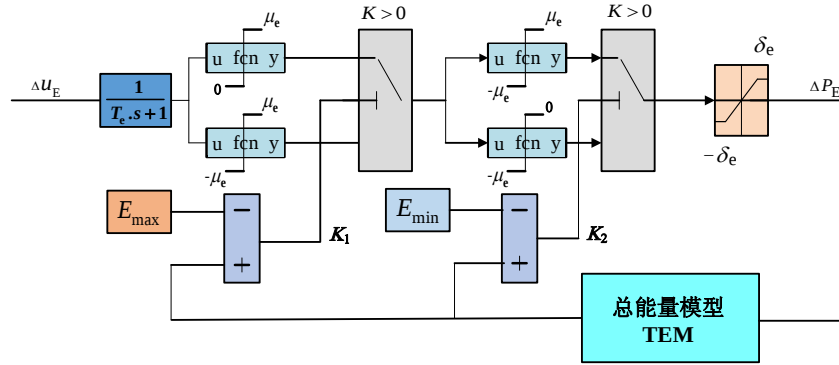


图 A1 电动汽车换电站能量等效模型框图

Fig.A1 Energy equivalent model diagram of EV charging station

附录 B

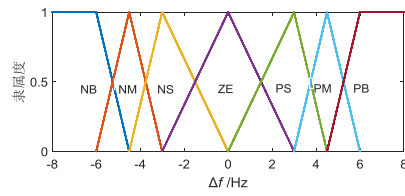


图 B1 输入变量 E 、 E_c 隶属度函数

Fig.B1 Membership function of input variables E and E_c

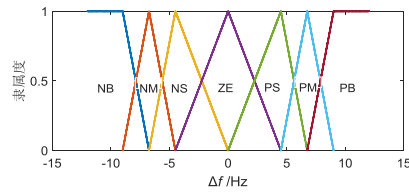


图 B2 输出变量 K_p 隶属度函数

Fig.B2 Membership function of output variable K_p

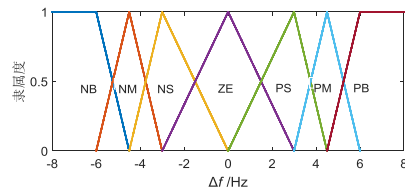


图 B3 输出变量 K_i 隶属度函数

Fig.B3 Membership function of output variable K_i

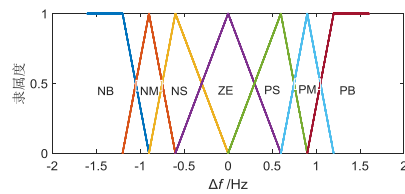


图 B4 输出变量 K_d 隶属度函数

Fig.B4 Membership function of output variable K_d

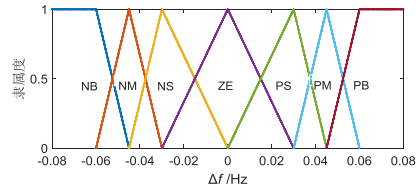


图 B5 输出变量 λ 、 μ 隶属度函数

Fig.B5 Membership function of output variable λ and μ

表 B1 ΔK_p 的模糊规则库
Table B1 Fuzzy rule base of ΔK_p

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 B2 ΔK_i 的模糊规则库
Table B2 Fuzzy rule base of ΔK_i

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

表 B3 ΔK_d 的模糊规则库
Table B3 Fuzzy rule base of ΔK_d

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZE
NS	ZE	NS	NM	NM	NS	NS	ZE
ZE	ZE	NS	NM	NM	NS	NS	ZE
PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

表 B4 $\Delta \lambda$ 的模糊规则库
Table B4 Fuzzy rule base of $\Delta \lambda$

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	PS
NS	NM	NM	NM	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	ZE	PM	PM	PM	PB	PB

表 B5 $\Delta\mu$ 的模糊规则库
Table B5 Fuzzy rule base of $\Delta\mu$

E_c	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	PS
NM	PB	PB	PB	PM	PM	PS	PS
NS	PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE
ZE	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
PS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
PM	PM	PM	PS	ZE	ZE	NS	NS
PB	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM

附录 C

表 C1 微电网系统模型参数
Table C1 Model parameters of microgrid system

参数	参数值	参数	参数值
逆变器时间常数 T_{in}/s	0.04	飞轮储能系统时间常数 T_{FESS}/s	0.1
互联设备时间常数 T_{ic}/s	0.004	蓄电池系统时间常数 T_{BESS}/s	0.1
调速器时间常数 T_g/s	0.08	燃料电池系统时间常数 T_{fc}/s	0.26
汽轮机时间常数 T_t/s	0.4	光伏电源时间常数 T_{pv}/s	1.8
负荷阻尼系数 $D/(p.u. \cdot Hz^{-1})$	0.015	风力电源时间常数 T_{wtg}/s	1.5
发电机惯性常数 $2H/s$	0.1667	调差系数 $R/(Hz \cdot p.u.^{-1})$	3

表 C2 控制器基本参数
Table C2 Basic parameters of controller

参数	数值		
	传统 PID 控制器	分数阶 PID 控制器	模糊分数阶 PID 控制器
K_p	2.725 7	6.336 9	4.678 9
K_i	10.465 1	11.791 6	12.717 6
K_d	0.653 3	0.496 2	0.470 0
λ		1.10	1.05
μ		1.227 6	1.251 9

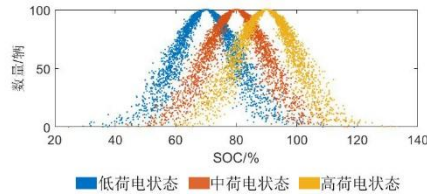


图 C1 电动汽车荷电状态与数量的随机分布

Fig.C1 Random distribution of SOC and quantity of EV

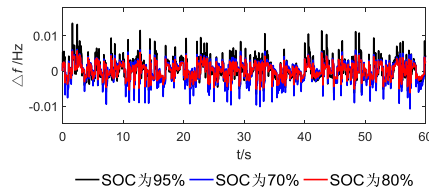


图 C2 随机扰动下电动汽车不同荷电状态的频率偏差响应

Fig.C2 Frequency deviation response of different SOC values under random disturbances