

基于自适应事件触发控制的微电网二次恢复

宋 玮, 许天宏, 李朝阳

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月18日; 录用日期: 2025年4月11日; 发布日期: 2025年4月21日

摘 要

针对微电网一次控制引起的电压和频率下降问题, 本文提出了一种基于事件触发控制(ETC)和模型参考自适应控制的(MRAC)分布式控制策略, 该策略能够在存在噪声干扰和工况改变时实现微电网系统中电压和频率的协同精确恢复。首先通过反馈线性化和状态观测器对微电网的大信号模型进行改进, 在此基础上, 提出了基于事件触发的模型参考自适应控制律, 并通过理论证明了所提方法的稳定性以及不存在芝诺行为。最后, 通过仿真实验验证了所提方法的有效性, 能更好地应对现实生活中的应用场景。

关键词

事件触发控制, 自适应控制, 微电网分层控制, 二次恢复

Secondary Recovery of Microgrid Based on Adaptive Event-Triggered Control

Wei Song, Tianhong Xu, Chaoyang Li

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai

Received: Mar. 18th, 2025; accepted: Apr. 11th, 2025; published: Apr. 21st, 2025

Abstract

In response to the voltage and frequency drop issues caused by primary control in microgrids, this paper proposes a distributed control strategy based on Event-Triggered Control (ETC) and Model Reference Adaptive Control (MRAC). This strategy can achieve precise recovery of microgrid voltage and frequency in the presence of noise interference and changes in operating conditions. Firstly, the large-signal model of the microgrid is improved through feedback linearization and state observer design. Based on this, an event-triggered model reference adaptive control law is proposed, and the stability of the proposed method as well as the exclusion of Zeno behavior are theoretically proven. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through simulation experiments, and it can better cope with real-life application scenarios.

Keywords

Event-Triggered Control, Adaptive Control, Hierarchical Control of Microgrids, Secondary Recovery

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

分布式发电[1]凭借其将低容量的可再生能源布置在用户或负载附近就近发电的优势,有效缓解了能源危机和电力长距离输送过程中带来的损耗问题。但是,随着越来越多的分布式电源接入电网,也给传统电网的稳定运行带来了新的挑战:可再生能源(光伏、风力等)功率输出具有间歇性和波动性,尤其是在高渗透系统下稳定性变差。为了充分挖掘可再生能源的效益和价值,国内外学者提出了微电网的概念。

微电网本身既是可控发配电单元,又可以视为一个可调度的负荷或电源,通过内部分布式电源(Distributed Generation, DG)的协调控制实现与大电网间的功率双向流动。为了提高系统的运行水平,根据欧盟电力传输协会(UCTE)定义的大电网分级控制标准,通常将微电网分为三层控制[2]:一级控制是基于虚拟阻抗的本地下垂控制,二次控制的主要功能是实现微电网有功功率和无功率间的合理分配,消除由一次控制引起的电压和频率偏差,三次控制是微电网的能量管理层,用于灵活改变电力系统的调度策略。其中,二次控制也就是微电网电压和频率的恢复问题对于整个系统的稳定有着举足轻重的作用,因此一直是本领域研究的重点对象。

实现二次控制目标的关键是系统中风、光、柴、储等多类型分布式电源在不同场景下的及时的信息交换来协调各自的目标和行为。基于多智能体的分布式协同控制算法,以个体和个体之间稀疏的通信网络为媒介进行交互实现全局的信息共享,最终获得本地控制决策的优化。Lewis [3]等提出利用输入输出反馈线性化将逆变器非线性动态特性线性化,从而将微电网二次控制转为线性二阶系统的分布式一致性跟随问题。Zhang [4]等提出了基于自适应虚拟阻抗的分布式协同电压控制算法,从而实现无功功率的精确分配和平均电压恢复。Zhang J [5]提出了基于领导者-跟随者共识的分布式策略。它通过固定增益减少了本地 DG 和直流母线之间的通信通道。然而,由于周期性的通信,大量的信息流经通信网络。这意味着微电网网络中可能存在通信冗余和业务拥塞。因此,分布式控制方案需要进一步改进。

在保证系统动态性能的前提下为了减少单位时间内的通信次数以避免通信阻塞的影响,Qian [6]等人提出了基于事件触发机制(ETC)的微电网协同控制策略,根据指定的控制目标设计合理的事件触发条件,与周期性的控制相比,这种控制方式仅在控制目标设计的控制量满足触发条件时才会去触发通信网络传输数据产生新的控制指令。Zhang Z [7]进一步提出了考虑通讯延时的微电网事件触发策略,将二次控制基于下垂特性分为不同的阶段,再将不同的电压或者电流测量值触发不同阶段的策略。

但是上述的控制策略只考虑了理想情况下 DG 的通讯特性,实际的系统在运行过程中会受到参数摄动、通信拓扑改变(分布式微源的插拔)和运行工况等内外扰动的影响,这会对系统的稳定性带来很多不确定因素的影响。

为了解决上述问题,本文提出了一种事件触发自适应控制方法来实现存在不确定性和扰动情况下对微电网电压和频率的精确恢复。首先,通过反馈线性化技术,将微电网的非线性大信号模型简化为线性模型,降低了控制设计的复杂性。其次,设计了扩展状态观测器(ESO),用于估计系统中的不确定性和扰

动,从而增强了控制系统的鲁棒性。在此基础上,提出了基于事件触发的模型参考自适应控制律,仅在系统状态达到触发条件时进行信息交换,显著减少了通信资源的消耗。所提出的控制策略能够在负载突变、参数扰动和测量噪声等情况下,实现对微电网电压和频率的精确恢复。最后,通过仿真实验验证了所提方法的有效性。仿真表明,相较现有方法,自适应事件触发控制在通信负载降低的同时,抗扰动能力提升,且支持即插即用场景。未来工作将探索其在多能源微电网与 AI 融合方向的应用。

2. 基础知识与问题描述

2.1. 微电网大信号模型

图 1 展示了逆变型分布式电源的本地控制结构。分布式电源通过一个开关连接到 LC 滤波器,LC 滤波器用于滤除电源输出中的高频噪声。滤波后的电流通过连接阻抗后,输出到母线电压。控制系统包括电压电流控制器和功率控制器两个主要部分。电压电流控制器负责调节输出电压和电流,以满足系统的稳定运行要求。功率控制器则包括下垂控制、滤波器和功率计算三个模块,其中:下垂控制模块根据输入的频率和电压来调整输出,以实现分布式电源之间的功率分配;滤波器模块处理功率信号,提取出有功功率和无功功率;功率计算模块则根据滤波后的功率信号进行进一步的计算和分析。整个控制系统通过反馈回路来调整分布式电源的输出,以确保其与母线电压的同步和稳定。

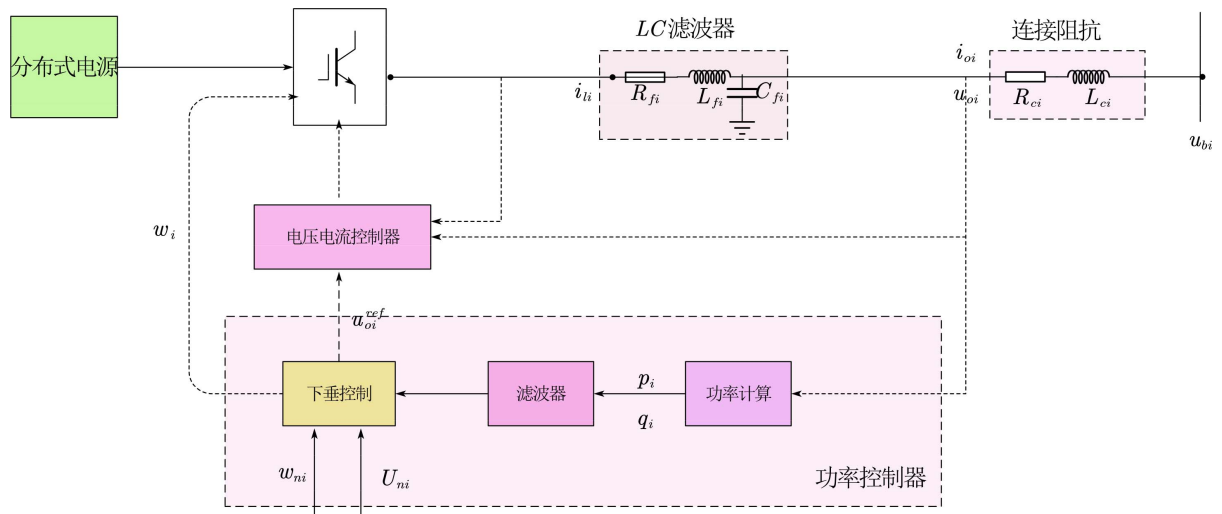


Figure 1. Distributed power generation control structure diagram

图 1. 分布式电源控制结构图

在微电网中,多个 DG 单元需要同步运行,以确保系统的频率和电压稳定。为了实现同步,每个 DG 的旋转角度差 δ_i 需要被控制,使得所有 DG 的旋转角度差趋于一致,这里我们把每个 DG 的参考系视为具有旋转频率 ω_{com} 的公共参考系, δ_i 满足以下微分方程

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_{com} \quad (1)$$

下垂原理描述了有功功率与角频率之间的关系,以及无功功率与输出电压幅值之间的关系:

$$v_{odi}^* = V_{ni} - n_{Qi} Q_i \quad (2)$$

$$\omega_i = \omega_{ni} - m_{Pi} P_i \quad (3)$$

$$v_{oqi}^* = 0 \quad (4)$$

其中 v_{odi}^* 、 v_{oqi}^* 是输出电压从参考值的 d 轴和 q 轴分量； m_{pi} 、 n_{Qi} 是分布式电源频率和电压的下垂系数； ω_{ni} 、 V_{ni} 表示频率和输出电压的额定值。

分布式电源输出的有功功率和无功功率的平均值可以由瞬时有功和无功功率通过剪切频率为 ω_{ci} 的一阶低通滤波器计算得到：

$$P_i = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} (v_{odi} i_{odi} + v_{oqi} i_{oqi}) \quad (5)$$

$$Q_i = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} (v_{oqi} i_{odi} - v_{odi} i_{oqi}) \quad (6)$$

式中 v_{odi} 、 v_{oqi} 、 i_{odi} 、 i_{oqi} 分别表示输出电压和输出电流的 d 轴和 q 轴分量。

利用在[8]中探讨的电压控制器和电流控制器的动态模型，忽略双环控制器的快速动态特性，第 i 个 DG 的大信号状态空间模型可以表示为如下的多输入多输出控制系统：

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i) \mathbf{u}_i + \mathbf{k}_i(\mathbf{x}_i) \mathbf{D}_i \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{d}_i \mathbf{u}_i \quad (8)$$

其中状态变量 $\mathbf{x}_i = [\delta_i P_i Q_i \phi_{di} \phi_{qi} \gamma_{di} \gamma_{qi} i_{Ldi} i_{Lqi} v_{odi} v_{oqi} i_{odi} i_{oqi}]^T$ ，控制变量 $\mathbf{u}_i = [\omega_{ni} V_{ni}]^T$ ，扰动变量 $\mathbf{D}_i = [\omega_{com} v_{bdi} v_{bqi}]^T$ ，系统输出 $\mathbf{y}_i = [\omega_i v_{odi}]^T$ ，本文的控制目标就是选择合适的 ω_{ni} 和 V_{ni} 来使 ω_i 和 v_{odi} 调节到期望值。

2.2. 非线性系统反馈线性化设计

考虑到微电网中分布式电源的动态特性具有非线性，为了简化问题的分析，将等式(7)~(8)表示的多输入多输出的模型变化为仅考虑输出电压的情况下：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i) \mathbf{u}_i + \mathbf{k}_i(\mathbf{x}_i) \mathbf{D}_i \\ &= \mathbf{F}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i) \mathbf{u}_i \\ \mathbf{y}_i &= v_{odi} = \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i) \end{aligned} \quad (9)$$

Lie 导数[9]是一种数学工具，用于描述函数沿向量场的导数，使用 Lie 导数将模型(9)线性化为线性状态空间模型

$$\begin{aligned} \dot{y}_{i,1} &= y_{i,2} \\ \dot{y}_{i,2} &= L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i) + L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i) u_i = v_i \\ y_i &= y_{i,1} = v_{odi} \\ u_i &= \frac{v_i - L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)}{L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i)} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $y_{i,1} = v_{odi}$ ， $y_{i,2} = \dot{v}_{odi}$

2.3. 扩张状态观测器的设计

在本文中，电压的恢复和频率的恢复原理相同，这里只针对电压恢复进行研究，频率的恢复同理。在系统实际运行的过程中会受到测量噪声的影响，因此获得每个 DG 的精确状态 $\dot{v}_{odi}$ 、 $v_i - L_{F_i}^2 h_i(\mathbf{x}_i)$ 、 $L_{g_i} L_{F_i} h_i(\mathbf{x}_i)$ 是不现实的，扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)的作用是通过估计系统中的不确定性和扰动，提供更精确的状态信息，因此对于二阶系统我们有：

$$\begin{cases} \dot{y}_{i,1} = y_{i,2} \\ \dot{y}_{i,2} = y_{i,3} + g_{i0}u_i \\ \dot{y}_{i,3} = \xi(y_{i,3}) \\ y_i = y_{i,1} \end{cases}$$

$$g_i = g_{i0} + \Delta g_i = L_{g_i} L_{F_i} h_i(x_i) \quad (11)$$

$$y_{i,3} = f(y_{i,3}) + \Delta g_i u_i = L_{F_i}^2 h_i(x_i) + \Delta g_i u_i$$

其中 $[y_{i,1}, y_{i,2}]^T$ 表示状态变量, g_{i0} 和 Δg_i 分别表示 g_i 的标称值和参数不确定度。拓展状态 $y_{i,3}$ 用来估计 DG 内部控制回路的动态以及系统的总不确定性和干扰的附加状态。通过引入扩展状态, ESO 能够更准确地估计系统的状态变量, 从而提高控制系统的鲁棒性。

下面做出两个假设, 以便于改进上述观测器。

假设 1:

系统中的函数 $f(y_{i,3})$ 、控制输入 u_i 、以及扩展状态的动态方程 $\xi(y_{i,3})$ 在其定义域内是局部 Lipschitz 连续的, 并且是有界的, 且 $f(y_{i,3})|_{t=0} = 0$ 。

假设 2:

系统的输出 $y_i = y_{i,1}$ 和其导数都是有解的。

Lipschitz 连续性意味着函数的变化率是有限的, 即函数不会在任意小的区间内发生无限大的变化。在 ESO 的设计中, Lipschitz 连续性确保了扩展状态的动态变化是平滑的, 不会出现突变或不连续的情况。有界性确保了扩展状态不会无限增长, 保证了观测器的估计值始终在合理的范围内。这两条假设会确保系统的动态行为是平滑且有界的。通过假设系统的输出及其导数是有界的, ESO 能够在系统的动态变化范围内进行有效的状态估计, 并且能够快速收敛到实际系统的状态。

因此我们有

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}_{i,1} = \hat{y}_{i,2} - G_1 e_i \\ \dot{\hat{y}}_{i,2} = \hat{y}_{i,3} - G_2 e_i + g_{i0} u_i \\ \dot{\hat{y}}_{i,3} = -G_3 e_i \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\hat{y}_{i,1}, \hat{y}_{i,2}, \hat{y}_{i,3}$ 是估计的状态变量。 $e_i = y_i - \hat{y}_{i,1}$ 是估计误差, g_{i0} 是系统的名义增益, 表示控制输入对系统的影响; G_1, G_2, G_3 是观测器的增益, 用于调节估计误差的收敛速度。

观测器的增益的选择对 ESO 的性能至关重要。增益过大可能导致系统对噪声敏感, 增益过小可能导致估计误差收敛速度过慢。可以通过下式来确定。

$$G_j = \chi_{(n,j)} \omega_0^j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

其中的二项式系数 $\chi_{(n,j)} = \frac{n!}{j!(n-j)!}$, 参数 ω_0 则用来表示状态估计的收敛速度与噪声和采样时间之间的权衡程度。

3. 基于事件触发的模型参考自适应控制电压控制率的设计

经过反馈线性化和 ESO 状态估计观测器后, 我们考虑如下的带不确定性扰动的 DG 线性模型:

$$\dot{x}_p(t) = A_p(t)x_p(t) + B_p(t)(u_p(t) + \Theta(t)\Phi(x_p(t))) \quad (14)$$

其中, 状态向量 $x_p(t) = [y_{i,1}, y_{i,2}]^T = [v_{odi}, \dot{v}_{odi}]^T$, $u_p(t)$ 为控制输入, A_p 和 B_p 分别为系统矩阵和输入矩阵,

不确定性部分为 $\Theta(t)\Phi(x_p(t)) = \hat{y}_{i,3}$ ，可以通过上述的观测器方程(12)得到。本文的第一个控制目标是使得每一个 DG 的状态能够追踪参考轨迹，即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_p^{(i)}(t) - x_m(t)\| = 0 \quad \forall i \quad (15)$$

其中的参考轨迹由如下给出的参考模型生成

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r_m(t) \quad (16)$$

$x_m(t)$ 是参考模型的状态，这里我们设定为 $x_m(t) = [v_{ref}, 0]^T$ ，即实现 $v_{odi} \rightarrow v_{ref}$ ， $\dot{v}_{odi} \rightarrow 0$ ； $r_m(t)$ 是参考输入，在微电网中通常表示外部指令或期望的电压/频率变化。

第二个控制目标是使得每个 DG 的状态都能够与其他的 DG 趋于一致，即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_p^{(i)}(t) - x_p^{(j)}(t)\| = 0 \quad \forall i, j \quad (17)$$

由于我们的控制目标是使得电压恢复，借鉴多智能体一致性的相关知识，它的本质是一个带领导者的牵制一致性问题，多 DG 之间的一致性误差定义为

$$e_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_p^{(i)}(t) - x_p^{(j)}(t)) + b_i (x_p^{(i)}(t) - x_m(t)) \quad (18)$$

为了节省控制器的通信资源，本文引入了事件触发的通信方式，此时系统不需要在每个时刻都进行状态采样和传输，仅在满足特定触发条件时才会进行采样和传输

$$\bar{x}_p(t) = \begin{cases} x_p(r_j) & \forall t \in (r_j, r_{j+1}] \\ x_p(t) & t = r_j \end{cases} \quad (19)$$

具体来说，当 t 处于连续两个采样的时刻 r_j 和 r_{j+1} 之间时，系统在时间 t 时刻的实际状态 $\bar{x}_p(t)$ 取值为上一时刻采样时刻的状态 $x_p(r_j)$ ，当 t 正好等于采样时刻 $x_p(r_j)$ 时，则取值为当前时刻的实际状态，当前状态和采样状态的误差定义为

$$e_p(t) := \bar{x}_p(t) - x_p(t) \quad (20)$$

下一个触发点可以通过如下的等式去计算。具体的事件触发条件将在下文中指定。

$$r_{j+1} := \inf \{t \in \mathbb{R} | t > r_j \wedge f_e(e_p(t), x_p(t), x_m(t), r_m(t)) \geq 0\} \quad (21)$$

综上所述，根据样本状态并参考基于 Lyapunov 的 MRAC 方法[14]，控制器可以按以下形式设计：

$$u_p^{(i)}(t) = K_1(t)\bar{x}_p^{(i)}(t) + K_2(t)r_m(t) + K_3(t)\Phi(\bar{x}_p^{(i)}(t)) + K_4(t)e_i(t) \quad (22)$$

其中 $K_1(t)$ 是自适应状态反馈增益矩阵，用于调节本地状态 $x_p^{(i)}(t)$ 对控制输入 $u_p^{(i)}(t)$ 的影响； $K_2(t)$ 用于调节参考输入 $r_m(t)$ 对控制输入 $u_p^{(i)}(t)$ 的影响、 $K_3(t)$ 自适应非线性补偿增益矩阵，用于抵消系统中的非线性扰动或未建模动态、 $K_4(t)$ 是自适应一致性增益矩阵，用于调节多智能体一致性误差，确保分布式发电机(DG)之间的状态一致性，通过自适应律动态调整这些增益，系统能够在存在扰动和通信受限的情况下，实现稳定的跟踪与一致性控制。

受[10]中方法的启发，本文设计了如下的自适应律来保证稳定性，即在标准模型参考自适应控制器中引入反馈项，使用事件触发状态来代替 $x_p(t)$ 的连续测量

$$K_1(t) = \int_{t_0}^t \left[-\frac{1}{\gamma_1} B_m^T P \bar{e}_p(t) \bar{x}_p^T(t) l - m_1 K_1(t) \right] dt + K_1(t_0) \quad (23)$$

$$K_2(t) = \int_{t_0}^t \left[-\frac{1}{\gamma_2} B_p^{(i)T} P \bar{x}_p^{(i)}(t) r_m^T(t) - m_2 K_2(t) \right] dt + K_2(t_0) \quad (24)$$

$$K_3(t) = \int_{t_0}^t \left[-\frac{1}{\gamma_2} B_p^{(i)T} P \bar{x}_p^{(i)}(t) r_m^T(t) - m_2 K_2(t) \right] dt + K_3(t_0) \quad (25)$$

$$K_4(t) = \int_{t_0}^t \left[-\frac{1}{\gamma_4} B_p^{(i)T} P \bar{x}_p^{(i)}(t) e_i^T(t) - m_4 K_4(t) \right] dt + K_4(t_0) \quad (26)$$

其中 $e_p(t) := \bar{x}_p(t) - x_m(t)$, P 是正定矩阵, 满足 $A_m^T P + P A_m = -Q$

此外, (21)式中提到的事件触发条件被定义为

$$f_e(e_p^{(i)}(t), x_p^{(i)}(t), x_m(t), r_m(t)) = \|e_p^{(i)}(t)\| \cdot L(t) - \frac{\alpha}{2} \|e_i(t)\|^2 - \beta \quad (27)$$

其中动态权重系数 $L(t)$ 综合了系统状态、控制增益、扰动估计以及参考输入等信息, 将(22)式代入(14)式, 此时的闭环系统的表达式为, 如图 2 所示

$$\dot{x}_p^{(i)}(t) = A_p^{(i)}(t) x_p^{(i)}(t) + B_p^{(i)} \left[K_1(t) \bar{x}_p^{(i)}(t) + K_2(t) r_m(t) + K_3(t) \Phi(\bar{x}_p^{(i)}(t)) + K_4(t) e_i(t) \right] + \hat{y}_{i,3} \quad (28)$$

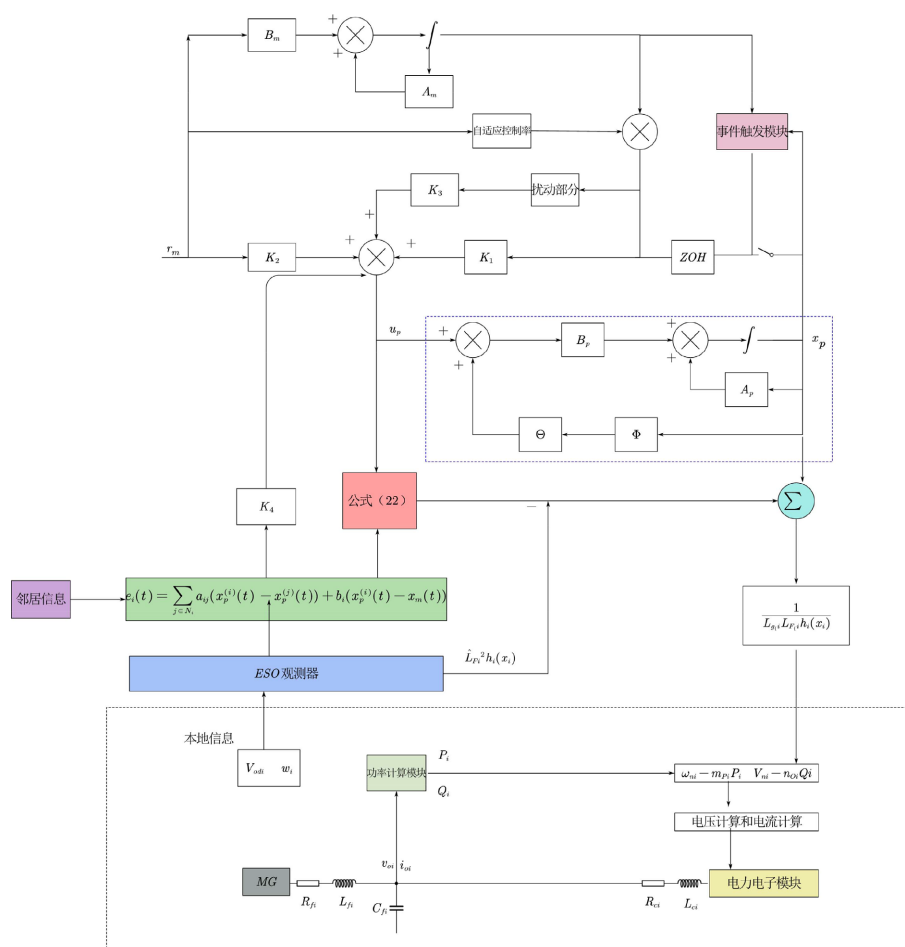


Figure 2. Schematic diagram of the proposed method

图 2. 所提方法示意图

4. 稳定性的证明和 Zeno 行为的排除

4.1. 闭环系统的稳定性

这里我们做出两个假设：

- 1) 扰动有界性：ESO 的估计误差 $\Delta_i(t) = \hat{d}^{(i)}(t) - d^{(i)}(t)$ 是有界的
- 2) 通信拓扑连通性：邻接矩阵 a_{ij} 和系数 b_i 构成的图是联通的

定义 Lyapunov 函数为：

$$V(t) = \sum_{i=1}^N \left[e_i^T(t) P e_i(t) + \text{tr}(\gamma_1^{-1} \tilde{K}_1^T(t) \tilde{K}_1(t)) + \cdots + \text{tr}(\gamma_4^{-1} \tilde{K}_4^T(t) \tilde{K}_4(t)) \right] \quad (29)$$

正定性的验证：因为 P 是正定矩阵，对所有非零的 $e_i(t)$ ， $e_i^T(t) P e_i(t) \geq 0 \quad \forall e_i(t)$ ，跟踪误差严格大于零；而对于增益误差项，对任意增益误差矩阵 $\tilde{K}_k(t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ，迹运算满足：

$$\text{tr}(\gamma_k^{-1} \tilde{K}_k^T(t) \tilde{K}_k(t)) = \gamma_k^{-1} \sum_{i,j} (\tilde{K}_k(t))_{i,j}^2 \geq 0 \quad (30)$$

即增益误差项是增益矩阵元素的平方和，也是非负的。对此 Lyapunov 函数求导：

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^N \left[2e_i^T(t) P \dot{e}_i(t) + 2\text{tr}(\gamma_1^{-1} \tilde{K}_1^T(t) \dot{\tilde{K}}_1(t)) + \cdots + 2\text{tr}(\gamma_4^{-1} \tilde{K}_4^T(t) \dot{\tilde{K}}_4(t)) \right] \quad (31)$$

代入(23)~(26)式，并利用迹的运算性质得到

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^N \left[-e_i^T(t) Q e_i(t) + 2e_i^T(t) P \Delta_i(t) - m_1 \|\tilde{K}_1(t)\|_F^2 - \cdots - m_4 \|\tilde{K}_4(t)\|_F^2 \right] \quad (32)$$

对交叉项 $2e_i^T P B \Delta_i$ 利用 Young 不等式[11]进行放缩

$$2e_i^T(t) P \Delta_i(t) \leq \frac{1}{\epsilon} \|P\|^2 \|e_i(t)\|^2 + \epsilon \|\Delta_i(t)\|^2 \quad (33)$$

其中参数 ϵ 控制跟踪误差项和扰动项和权重，需要满足不等式链中的主导项为负定项，为此这个参数的选择需要基于如下的不等式 $\frac{\|P\|^2}{\epsilon} \leq \lambda_{\min}(Q)$ 。带入后跟踪误差导数项变为

$$2e_i^T P \dot{e}_i \leq 2e_i^T P A e_i + \frac{1}{\epsilon} \|P e_i\|^2 + \epsilon \|\Delta_i\|^2 + 2 \sum_{k=1}^4 e_i^T P C_k \tilde{K}_k \phi_k(x_i) \quad (34)$$

将跟踪误差的导数项和参数误差导数项合并代入后得到

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^N \left[-\lambda_{\min}(Q) \|e_i(t)\|^2 + \frac{1}{\epsilon} \|P\|^2 \|e_i(t)\|^2 + \epsilon \Delta_{\max}^2 - m \|\tilde{K}_1(t)\|_F^2 - \cdots - m_4 \|\tilde{K}_4(t)\|_F^2 \right] \quad (35)$$

选择合理的参数使得 $\lambda_{\min}(Q) > \frac{1}{\epsilon} \|P\|^2$ 则存在常数 $\alpha, \beta > 0$ 使得此时的导数包含一个线性衰减项和常数扰动项，通过比较原理(Comparison Lemma)[12]，可以证明当 $\dot{V}(t) \leq -\alpha V(t) + \beta$ 时，系统的能量函数满足 $V(t) \leq V(0)e^{-\alpha t} + \frac{\beta}{\alpha} \quad \forall t \geq 0$ 。其中 $\alpha = \min \left(\lambda_{\min}(Q) - \frac{\|P\|^2}{\epsilon}, m_1, m_2, m_3, m_4 \right)$ ， $\beta = N \epsilon \Delta_{\max}^2$ 因此，系统的跟踪误差和参数误差最终会被限制在一个范围内，即系统是最终一致有界的，稳定性得证。

4.2. Zeno 行为的排除

在上述的论述中，事件触发条件为 $\|e_p^{(i)}(t)\| \cdot L_i(t) \geq \frac{\alpha}{2} \|e_i(t)\|^2 + \beta$ ，其中 $e_p^{(i)}(t) = \bar{x}_p^{(i)}(t) - x_p^{(i)}(t)$ 是 DG_i

的本地采样误差, $L_i(t)$ 是本地状态相关项, 满足 $L_i(t) \leq L_{\max}$, 当上述条件满足时, DG_i 更新控制输入 $u_p^{(i)}(t)$ 并广播给其邻居节点。

Zeno 行为的定义是系统在有限时间内触发无限次事件。要排除 **Zeno** 行为, 需证明相邻触发间隔时间 $\tau_j = t_{j+1} - t_j$ 存在正的下界大于 0, 即:

$$\tau_j \geq \tau_{\min} \quad \forall j \in \mathbb{N} \quad (36)$$

由于在两次触发时刻之间的控制输入保持不变, 有 $\bar{x}_p^{(i)}(t) = x_p^{(i)}(t_j) \quad \forall t \in [t_j, t_{j+1})$ 因此, 采样误差的动态行为可以定义为:

$$\frac{d}{dt} e_p^{(i)}(t) = -\dot{x}_p^{(i)}(t) \quad (37)$$

接下来估计采样误差的增长速率, 在区间 $t \in [t_j, t_{j+1})$ 内, 采样误差的导数为

$$\frac{d}{dt} \|e_p^{(i)}(t)\| = \frac{d}{dt} \|x_p^{(i)}(t_j) - x_p^{(i)}(t)\| \leq \|\dot{x}_p^{(i)}(t)\| \leq M \quad (38)$$

我们假设这个系统具有动态有界性 $\|\dot{x}_p^{(i)}(t)\| \leq M$, 这里对假设的合理性做出说明, 在实际物理系统中, 电压或频率的变化受限于发电机、逆变器的最大功率输出能力和响应速度, 因此这种假设是合理的。对其积分得到

$$\|e_p^{(i)}(t)\| \leq \int_{t_j}^t \|\dot{x}_p^{(i)}(\tau)\| d\tau \leq M(t - t_j) \quad (39)$$

分析触发时刻的下限, 在触发时刻 t_{j+1} 有

$$\|e_p^{(i)}(t_{j+1})\| \cdot L_i(t_{j+1}) = \frac{\alpha}{2} \|e_i(t_{j+1})\|^2 + \beta \quad (40)$$

$$\frac{\alpha}{2} \|e_i(t_{j+1})\|^2 \leq \|e_p^{(i)}(t_{j+1})\| \cdot L_{\max} \quad (41)$$

结合 $\|e_p^{(i)}(t)\| \leq M\tau_j$, 可得

$$\frac{\alpha}{2} \|e_i(t_{j+1})\|^2 + \beta \leq M\tau_j L_{\max} \quad (42)$$

假设 $e_i(t)$ 有下界, 且此时的系统未完全收敛 $\|e_i(t)\| \geq e_{\min} > 0$, 则

$$\frac{\alpha}{2} e_{\min}^2 + \beta \leq M\tau_j L_{\max} \quad (43)$$

解得

$$\tau_j \geq \frac{\frac{\alpha}{2} e_{\min}^2 + \beta}{ML_{\max}} = \tau_{\min} > 0 \quad (44)$$

若此时的系统已经收敛到稳态, 即 $\|e_i(t)\| \approx 0$, 触发条件简化为:

$$M\tau_j L_{\max} \geq \beta \Rightarrow \tau_j \geq \frac{\beta}{ML_{\max}} = \tau_{\min'} > 0 \quad (45)$$

因此, 无论系统处于暂态还是稳态, 触发间隔均存在正的下界:

$$\tau_{\min} = \min \left(\frac{\frac{\alpha}{2} e_{\min}^2 + \beta}{ML_{\max}}, \frac{\beta}{ML_{\max}} \right) > 0 \quad (46)$$

5. 实验验证

为了验证所提方法的有效性,在 Matlab/Simulink 中搭建如下的分布式拓扑结构,在整个分布式通信拓扑中,每个 DG 的本地控制器仅需要来自其相邻 DG 的参考和信息。通过使用所提出的电压控制算法更新下垂控制器,如图 3 所示。

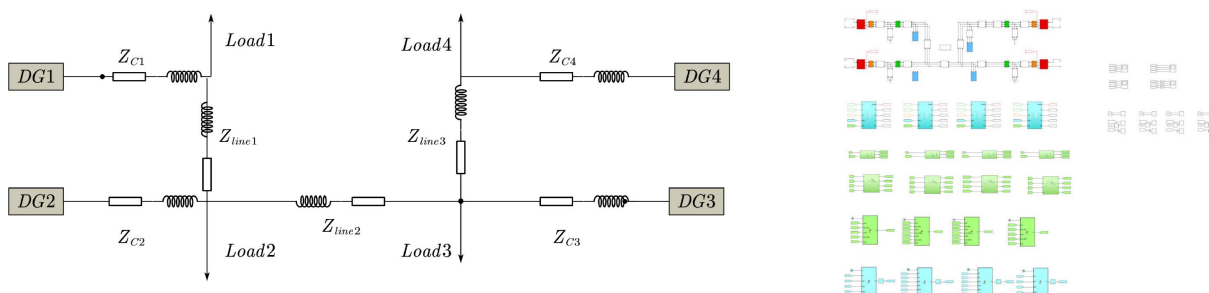


Figure 3. Schematic diagram of the simulation

图 3. 仿真示意图

本文设计了如下的仿真场景来验证控制算法的鲁棒性以及现实场景中可能出现的即插即用特性

- ① 2 s 时激活所提出的控制算法
- ② 3 s 时增加负载 2 的阻抗(模拟设备出现的老化或者温度的变化)
- ③ 4 s 时引入测量噪声
- ④ 6 s 时断开 DG4, 模拟设备故障退出运行的情况
- ⑤ 8 s 时重新连接, 模拟设备故障消除经过与同步后重新连入电网(如图 4 通信拓扑由 a $\rightarrow$ b)

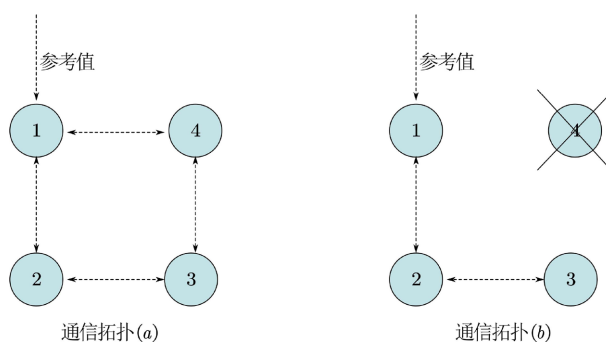


Figure 4. Schematic diagram of the change of the communication topology

图 4. 通信拓扑结构的改变

其中参数仿真参数的选择如下表 1 所示。

Table 1. Simulation parameter table

表 1. 仿真参数表

DG	DG1	DG2	DG3	DG4
m_p	6.28×10^{-5}	9.42×10^{-5}	12.56×10^{-5}	12.56×10^{-5}
n_Q	0.5×10^{-3}	0.75×10^{-3}	1×10^{-3}	1×10^{-3}

续表

R_f	0.1 Ω	0.1 Ω	0.1 Ω	0.1 Ω
L_f	1.35 mH	1.35 mH	1.35 mH	1.35 mH
C_f	47 μ F	47 μ F	47 μ F	47 μ F
R_c	0.02 Ω	0.03 Ω	0.04 Ω	0.04 Ω
L_c	2 mH	2 mH	2 mH	2 mH

实验结果如图 5 和图 6 所示,在上述的仿真条件下,由于下垂特性的作用,每个 DG 的电压或多或少发生了下降,偏离了额定值(311 V),在 2 s 时二次控制启动,所有 DG 的输出电压逐步同步收敛到了额定值,调节时间基本在 0.4 s 之内完成。接下来,当阻抗增加或者引入噪声时,电压经过小幅度震荡后很快恢复正常。值得注意的是,在第 6 s 和第 8 s 时,由于 DG4 的突然插拔,系统的瞬时功率会发生变化来应对突发情况,相对剧烈的电压变化反映了这一动态过程。还有一点需要说明的是即使 DG4 断开,但其他 DG 仍然在通讯和运行,因此系统中仍然存在电压信号,这就是 DG4 在断开后仍然可以检测到电压的原因。可以看到,通信失效对系统的控制性能几乎没有影响,系统在短时间内就恢复了正常,具有良好的控制性能和鲁棒性。

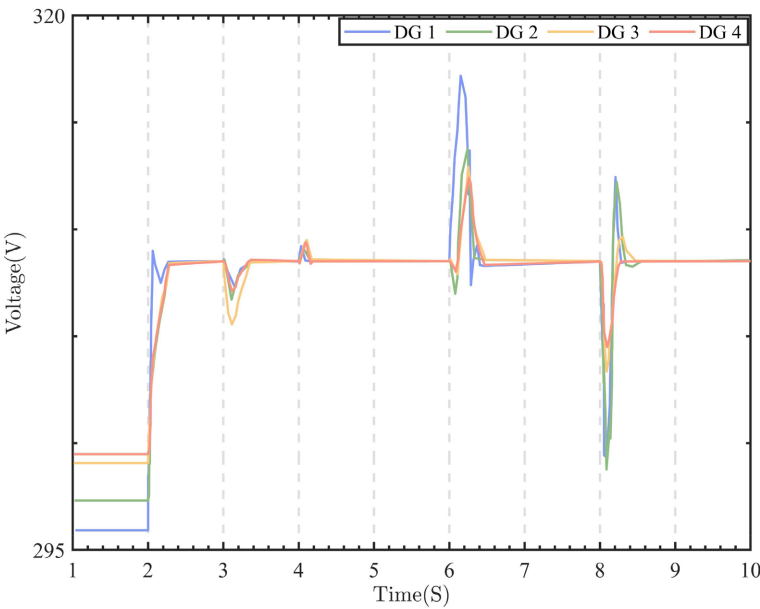


Figure 5. Voltage variation diagram for each DG
图 5. 各 DG 电压变化图

为了进一步说明本方法在事件触发上通讯效率的有效性,本文与[13]中的文章进行了对比试验,实验结果如图 7 所示,实验结果表明基于事件触发方法的响应速度比基于时间触发的更加快速,本文所提方法在 2.5s 左右已经达到了预定的控制目标,而常规方法在 2.77 s 才收敛到稳定状态。

6. 结论

本文基于自适应事件触发控制,对微电网分层控制的二次控制恢复提出了一种解决方案,该方法能很好的解决现有论文中只对理想通信拓扑情况分析而忽略了现实情况中存在的噪声扰动、拓扑结构改变等状

况，并通过实验证明了该方法的有效性和鲁棒性，系统能够在更加现实的状况中快速恢复正常，并且事件触发机制的引入也降低了通讯过程中的负担，该方法在通信效率、抗扰动能力及动态适应性方面显著优于现有研究，为未来智能微电网的工程化应用奠定了技术基础。

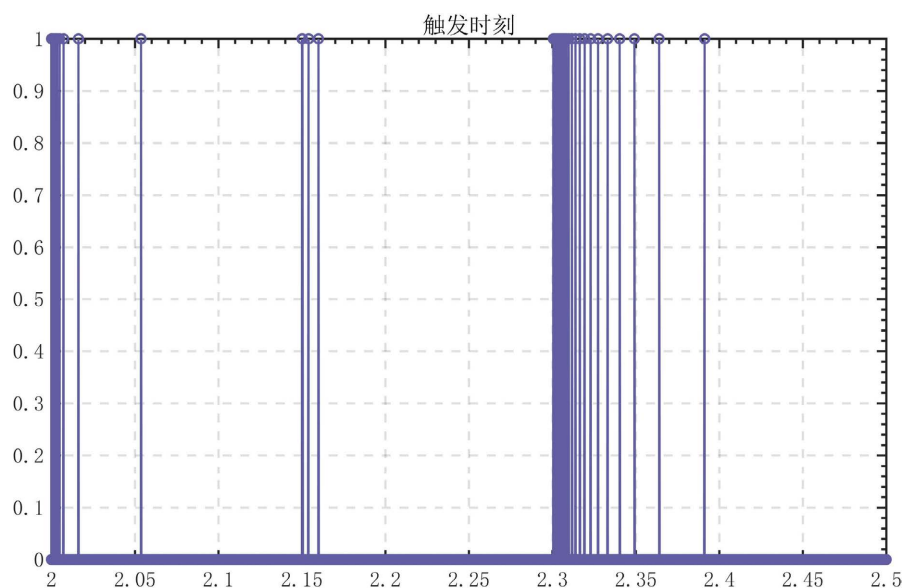


Figure 6. Trigger time of a certain period of DG

图 6. DG 的某段触发时刻图

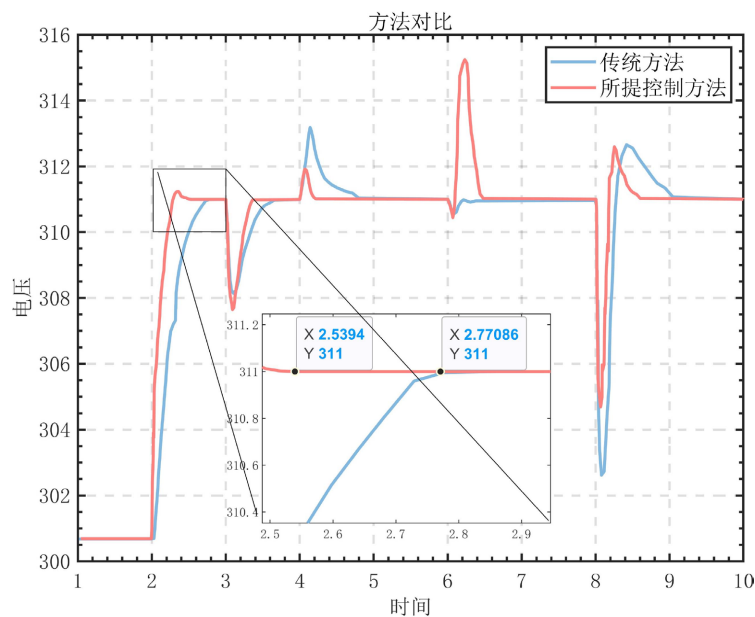


Figure 7. Method comparison chart

图 7. 方法对比图

参考文献

- [1] Singh, B. and Sharma, J. (2017) A Review on Distributed Generation Planning. *Renewable and Sustainable Energy*

-
- Reviews, **76**, 529-544. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.034>
- [2] Vandoorn, T.L., Vasquez, J.C., De Kooning, J., Guerrero, J.M. and Vandevelde, L. (2013) Microgrids: Hierarchical Control and an Overview of the Control and Reserve Management Strategies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, **7**, 42-55. <https://doi.org/10.1109/mie.2013.2279306>
 - [3] Kravaris, C. and Chung, C. (1987) Nonlinear State Feedback Synthesis by Global Input/output Linearization. *AIChE Journal*, **33**, 592-603. <https://doi.org/10.1002/aic.690330408>
 - [4] Zhang, H., Kim, S., Sun, Q. and Zhou, J. (2017) Notice of Removal: Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **8**, 1749-1761. <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2506760>
 - [5] Zhang, J., Zhang, H., Sun, S. and Gao, Z. (2021) Leader-follower Consensus Control for Linear Multi-Agent Systems by Fully Distributed Edge-Event-Triggered Adaptive Strategies. *Information Sciences*, **555**, 314-338. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.10.056>
 - [6] Qian, T., Liu, Y., Zhang, W., Tang, W. and Shahidehpour, M. (2020) Event-Triggered Updating Method in Centralized and Distributed Secondary Controls for Islanded Microgrid Restoration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **11**, 1387-1395. <https://doi.org/10.1109/tsg.2019.2937366>
 - [7] Zhang, Z., Dou, C., Yue, D., Zhang, B., Xu, S., Hayat, T., et al. (2019) An Event-Triggered Secondary Control Strategy with Network Delay in Islanded Microgrids. *IEEE Systems Journal*, **13**, 1851-1860. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2018.2832065>
 - [8] Yazdani, A. and Iravani, R. (2006) A Unified Dynamic Model and Control for the Voltage-Sourced Converter under Unbalanced Grid Conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**, 1620-1629. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2006.874641>
 - [9] Yano, K. (2020) The Theory of Lie Derivatives and Its Applications. Courier Dover Publications.
 - [10] Lavretsky, E. (2009) Combined/Composite Model Reference Adaptive Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **54**, 2692-2697. <https://doi.org/10.1109/tac.2009.2031580>
 - [11] Furuichi, S. and Minculete, N. (2011) Alternative Reverse Inequalities for Young's Inequality. *Journal of Mathematical Inequalities*, **5**, 595-600. <https://doi.org/10.7153/jmi-05-51>
 - [12] Deng, K. (1992) Comparison Principle for Some Nonlocal Problems. *Quarterly of Applied Mathematics*, **50**, 517-522. <https://doi.org/10.1090/qam/1178431>
 - [13] Chen, M., Xiao, X. and Guerrero, J.M. (2018) Secondary Restoration Control of Islanded Microgrids with a Decentralized Event-Triggered Strategy. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **14**, 3870-3880. <https://doi.org/10.1109/tii.2017.2784561>
 - [14] Pathak, K.B. and Adhyaru, D.M. (2019) Performance Analysis of Lyapunov Stability-Based and ANFIS-Based MRAC. *International Journal of Computational Systems Engineering*, **5**, 119-127. <https://doi.org/10.1504/ijcsyse.2019.100023>