

计及故障持续时间的电力系统暂态稳定分布式控制

陈世明[†], 余翔, 张微, 刘江, 钱成龙

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对电力系统故障持续时间会影响暂态稳定控制的问题, 本文提出了一种使系统在固定时间内恢复暂态稳定运行的策略. 该策略通过电力系统通信拓扑建模方法为每个发电机建立“邻居发电机”, 利用发电机本地信息和其邻居发电机的信息设计分布式控制器, 通过控制储能装置作用于受扰动后的系统, 使其在固定时间内恢复稳定运行. 其次, 此控制策略还解决了一些实际挑战, 如控制器的输入延时、外部的干扰、储能装置的容量限制等. 通过构建李雅普诺夫函数并利用图论知识对该策略展开了稳定性分析, 推导出了稳定系统的时间界限. 最后, 将控制器投入新英格兰39节点测试系统中, 并与其他控制器进行比较, 仿真结果验证了在低容量储能装置限制下和抗干扰性上控制器性能的优势.

关键词: 故障持续时间; 暂态稳定控制; 固定时间; 电力系统通信拓扑建模; 分布式控制器; 储能装置

引用格式: 陈世明, 余翔, 张微, 等. 计及故障持续时间的电力系统暂态稳定分布式控制. 控制理论与应用, 2024, 41(5): 905–913

DOI: 10.7641/CTA.2023.20520

Transient stable distributed control of power system grid considering fault duration

CHEN Shi-ming[†], YU Xiang, ZHANG Wei, LIU Jiang, QIAN Cheng-long

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: A strategy for restoring power system transient stability in a fixed time is proposed to address the issue that the duration of power system fault affects transient stability control. This strategy creates a “neighbor generator” for each generator by the power system communication topological modeling method, and uses the local information of the generator and that of its neighbor generator to design a distributed controller that acts on the disturbed system through controlling the energy storage device to restore its stable operation in a fixed time. Secondly, this control strategy tackles various practical challenges, such as the input delay of the controller, external interference, and the capacity constraint of the energy storage device. By constructing a Lyapunov function and using graph theory, a stability analysis of the strategy is developed, and then the time-bound of the stable system is derived. Finally, the controller is compared to other controllers using the New England 39-bus test system. The simulation results demonstrate the performance advantages of the controller under the restriction of low capacity energy storage device and the property of anti-interference.

Key words: duration of failure; transient stability control; fixed time; power system communication topology modeling; distributed controller; energy storage device

Citation: CHEN Shiming, YU Xiang, ZHANG Wei, et al. Transient stable distributed control of power system grid considering fault duration. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(5): 905–913

1 引言

21世纪以来, 随着可再生能源的高渗透率^[1]以及新能源汽车、需求侧管理等其他新技术的融合, 使电力系统运行具有更灵活的可变性^[2], 从而对于研究电力系统的稳定运行更加的重要.

随着现代科技的不断的发展, 越来越多的相位测量单元技术 (phasor measurement unit, PMU)、储能装置 (电池储能系统、飞轮装置) 等设备接入电力系统中, 以保证其安全运行^[3-4]. 文献[5-8]采用了励磁控制和调节原动机汽门的方法来提高电力系统的暂态稳定

收稿日期: 2022-06-13; 录用日期: 2023-03-28.

[†]通信作者. E-mail: c1977318@hotmail.com; Tel.: +86 13767055358.

本文责任编辑: 贺威.

国家自然科学基金项目(62263011, 61973118), 江西省重点研发计划重点项目(2021BBE51010)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62263011, 61973118) and the Key Project of Jiangxi Province Key Research and Development Plan (2021BBE51010).

性,这两种方法在调节速度上有一定的不足.为了更快速的调节失稳后的电力系统,进而引入了可以快速动作的外部储能装置来提高电力系统的稳定性.文献[9]给出了一种一致性比例积分(consistent proportional integral, CPI)的方法,该方法适用于电力系统频率调节,能够使储能装置快速作用于受扰动后的系统,使其恢复暂态稳定.近年来,研究者们基于多智能体框架,提出了许多控制策略来帮助电力系统实现暂态稳定控制^[10-14].文献[10-11]分别提出了参数反馈线性化(parameter feedback linear, PFL)和自适应PFL控制的策略,通过控制同步发电机附近的储能装置来提高电力系统暂态稳定裕度.但两者设计的方法均需要涉及到电力系统模型参数的非线性加速功率项,这可能无法精确的测量.对此,文献[12-13]分别提出了自适应模糊控制(adaptive fuzzy control, AFC)和基于神经网络的自适应控制策略来估计电力系统中的未知非线性项,以消除误差和补偿外部干扰,进而提高系统在受扰动后恢复稳定运行的能力.随着多智能体系统的一致性算法在电力网络中应用越来越广泛,有学者将其与电力系统暂态稳定问题联系起来^[13-14].文献[14]提出了基于二阶多智能体系统一致性理论的分布式有限时间控制方法,该方法通过控制分布式储能装置来提高智能电网抗扰动能力.

然而,在信息的传递过程中,控制器的输入延时是无法避免的,比如状态信息的处理时间、采样时间和通信延时,以及储能装置的反应时间等,这些时间延时都可以归为输入延时.文献[9-13]均没有考虑这一因素给控制器带来的影响,延时过大会导致控制器稳定不了系统,因此,输入延时对分布式控制器的性能来说是个十分重要的因素.文献[15]在考虑了控制器的输入延时的情况下,设计出了一种非线性控制器来改善电网的暂态稳定性.

在实际的电力系统运行工况中,断路器切除故障的时间会受到一些不利条件的影响,如互感器的误差、整定计算的误差、短路电流的非周期分量的影响等等.这些都会导致故障持续的时间不同,进而影响电力系统的稳定控制.在现有的电力系统暂态稳定控制方法^[5-15]中,都未曾考虑过故障持续时间会影响暂态稳定时间的问题,当故障持续时间太长造成的故障太大会影响控制器的性能,甚至不能使系统稳定.

综合考虑上述问题,本文基于多智能体系统固定时间一致性理论^[16],在考虑了控制器的输入延时和外部干扰下提出一种分布式固定时间控制策略.首先,本策略介绍了电力系统通信拓扑建模方法如何为每个发电机建立“邻居发电机”,利用发电机本地信息及其邻居发电机的信息设计分布式固定时间控制器,在控制器的设计过程中基于Artsein变换^[17],将带有控制器输入延时的系统模型转化成不显含输入延时的系

统模型.其次,当电力系统受到扰动后在控制回路中控制储能装置吸收或注入有功功率来使系统在一个固定时间内稳定,这一特点为估计系统稳定时间带来了极大的方便.最后,在考虑实际应用限制条件下将所设计的控制器投入到新英格兰39节点测试系统中,并将本文设计的控制器与CPI控制器^[9]、PFL控制器^[10]和文献[15]中的控制器进行了对比,仿真表明本文控制器在低容量储能装置的限制下和受外部干扰下的性能更好.并且在不同的故障持续时间下,本文控制器稳定系统的性能最优.

2 系统通信拓扑建模与基础知识

2.1 系统通信拓扑建模

本节通过电力系统通信拓扑建模来确定每个发电机的“邻居发电机”,目标是利用发电机的本地信息及其邻居发电机的信息设计分布式控制器.

由图论的基础定义可知,对于 N 个智能体的信息传递可视为一个无向图 $G = (V_N, E, A)$.其中: $V_N = \{1, 2, \dots, N\}$ 为节点集; $E \subseteq V \times V$ 为边集; $A = [a_{ij}]_{N \times N}$ 为邻接矩阵.假如有一条边将节点 i 与节点 j 相连,则二者互为邻居节点,它们都能获取双方的状态信息.节点 i 的邻居节点集合可以表示为 $N_i = \{V_j | (i, j) \in E\}$.图 G 中矩阵 A 中的元素 a_{ij} 定义如下:若任意两个节点 i 和 j 相连,则 $a_{ij} = a_{ji} > 0$,否则, $a_{ij} = 0$.图 G 的Laplace矩阵定义为 $L = C - A$, C 称为度矩阵且为对角矩阵,即: $C = \text{diag}\{c_1, c_2, \dots, c_N\}$,其中 $c_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, N$.

其次,考虑拓扑图 \bar{G} 在图 G 基础上多包含着一个虚拟领导者, $B = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ 称为领导者邻接矩阵,若第 i 个跟随者智能体通过通讯网络能获取领导者信息, $b_i > 0$,否则, $b_i = 0$.同时记参数矩阵为 $H = L + B$.

本文储能装置的安装方式可参考文献[10],如图1所示.结合代数图论知识对电力系统拓扑建模,可以把电力系统类比成一个多智能体系统.每个智能体都有以下部分组成:1)一台发电机;2)一个可测转子转角、转速的相量测量单元PMU;3)一种快速动作的分布式储能装置(distributed energy storage system, DESS);4)处理本地发电机和其邻居发电机的转子转角、转速信息的分布式控制器.此外,一个通信网络连接PMU、分布式控制器.控制器可以根据PMU测的数据来迅速控制储能装置对电网是否吸收或注入功率,从而实现电力系统暂态稳定.

本文以新英格兰39节点测试系统为例进行通信拓扑建模,其它系统也均是如此.利用邻接矩阵 A 中的元素 a_{ij} 大小来设定发电机之间的信息交流的强弱指标,在电力系统中指标大小取决于两个连通发电机节

点之间电气耦合强弱程度. 邻居发电机适宜选取原则为两发电机之间具有强电气耦合关系且在空间上距离较近. 在本文中定义: 若第*j*台发电机为发电机*i*的邻居发电机, 则 $a_{ij} = 1, j \neq i$. 否则, $a_{ij} = 0$. 由此, 该系统的通信网络图及其*A*矩阵如图2所示, 由 $L = C - A$, 可以得到该系统的Laplace矩阵.

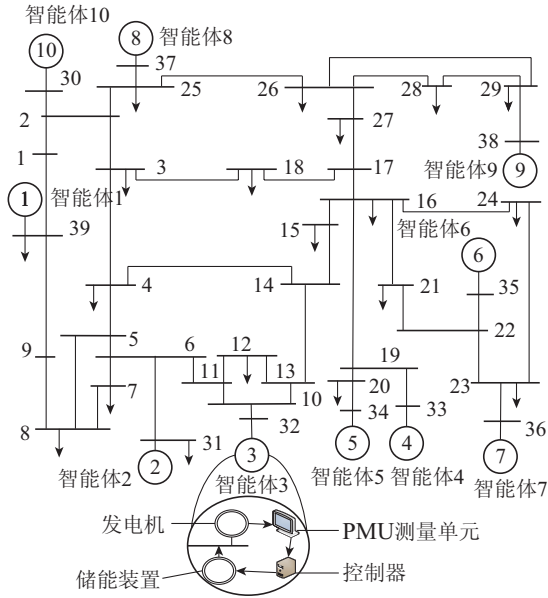


图1 新英格兰39节点系统分布式控制模型

Fig. 1 Distributed control model of New England 39-bus system

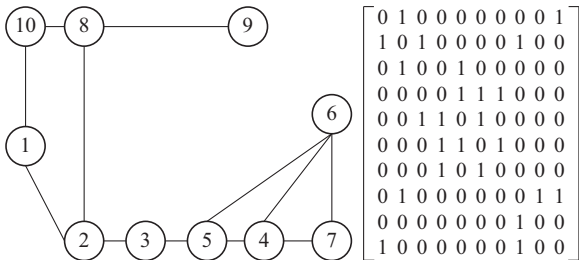


图2 测试系统通信网络和其邻接矩阵

Fig. 2 Test system communication network and adjacency matrix

2.2 相关定义和相关引理

考虑以下系统:

$$\dot{z} = g(t, z), z(0) = z_0, \quad (1)$$

其中: $z \in \mathbb{R}^N; g: \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^N$ 是一个非线性函数, 若 $g(t, z)$ 是不连续的, 此情况下式(1)的解是Filippov意义下的解^[18], 假设原点是式(1)的平衡点.

定义 1^[16] 若多智能体系统包含着*N*个智能体和一个领导者智能体, 系统状态方程可表示为

$$\dot{x}_i = - \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) - b_i(x_i(t) - x_0), \quad (2)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N; x_0$ 是领导者智能体的状态; 若在智能体的信息交换中领导者的信息能被其它跟随者获取时, 则该系统能达到渐近一致性, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = x_0(t), i = 1, 2, \dots, N$.

对于一个一阶有一个领导者的多智能体系统, 如果存在一个设定时间*T*使得 $\lim_{t \rightarrow T} |x_i(t) - x_0(t)| = 0$ 成立, 并且, 当 $t \geq T$ 时, $x_i(t) = x_0(t)$ 成立, 那么可以实现固定时间一致性跟踪. 其中, 设定时间*T*为有界值, 存在 $T_{\max} > 0$, 且 $T \leq T_{\max}$ 对任何的起始条件都是成立的.

引理 1^[19] 假如有一个连续的径向无界正定函数 $V: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}_+ \cup \{0\}$ 满足以下条件:

$$\dot{V}(z(t)) \leq -aV^m(z(t)) - bV^n(z(t)), \quad (3)$$

其中: $a, b > 0; m \in (1, \infty); n \in (0, 1)$, 则该系统(1)的原点能在固定时间内达到全局稳定, 且收敛时间满足

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{a(m-1)} + \frac{1}{b(1-n)}. \quad (4)$$

引理 2^[20] 若无向图*G*是连通的, 其Laplace矩阵*L*为对称矩阵而且半正定, 其特征值大小顺序可排为 $0 = \lambda_1 < \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$, 这里 λ_2 代表*L*的第2小特征值. 对于任意的 $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$, 当 $\sum_{i=1}^N x_i = 0$ 时, 满足 $x^T L_A x \geq \lambda_2 L_A x^T x$.

引理 3^[21-22] 假设 $x_1, x_2, \dots, x_N \geq 0$, 则有

$$N^{\sigma(p)(1-p)} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^p \leq \sum_{i=1}^N x_i^p,$$

其中 $\sigma(p) = \begin{cases} 0, & 0 < p < 1, \\ 1, & p > 1. \end{cases}$

3 分布式固定时间控制器设计

3.1 多电机系统动力学模型

考虑一个由*N*台同步发电机组成的电力系统, 与文献[23-24]类似, 利用控制分布式储能装置来实现系统的稳定. 相应的网络物理动力学发电机*i*的微分方程可以描述为

$$\dot{\delta}_i = \omega_i, \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (-D_i \omega_i + P_{mi} - P_{ei} + d_i(t) + u_i(t - \tau_i)), \quad (6)$$

$$P_{ei} = \sum_{j \in N_i} E_i E_j (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)), \quad (7)$$

其中: $\omega_i = \omega_i^{\text{act}} - \omega_N$; ω_i 为在同步旋转参考情况下第*i*发电机转子的实际速度与额定速度的变化值, 单位为rad/s; δ_i 为发电机*i*转子的实际功角与额定功角的变

化值,单位为rad,即 $\delta_i = \delta_i^{\text{act}} - \delta_N$; P_{mi} , P_{ei} 为发电机 i 的机械输入功率和输出电磁功率,两功率均用标么值表示; D_i , M_i 分别为阻尼系数和惯性常数; $u_i(t - \tau_i)$ 表示输入延时为 τ_i 的发电机 i 的控制器控制分布式储能装置的输出功率值; E_i 表示发电机 i 的内部电压; G_{ij} 和 B_{ij} 分别表示发电机 i 到发电机 j 之间的等效电导和电纳; $d_i(t)$ 为系统外部不确定时变有界的干扰,如噪声干扰、测量误差等。

因为同步发电机微分模型中的 $D_i\omega_i$ 为线性项, $P_{mi} - P_{ei}$ 为非线性项, 再加上扰动 $d_i(t)$, 所以, 本文将系统看作是一个具有输入延时和不确定干扰的非线性多智能体系统来处理。

令 $f_i(\omega_i) = \frac{-D_i\omega_i + P_{mi} - P_{ei}}{M_i}$, 则上式(6)发电机的转子速度微分动力学方程可重新写为

$$\dot{\omega}_i = f_i(\omega_i) + \frac{d_i(t)}{M_i} + \frac{u_i(t - \tau_i)}{M_i}. \quad (8)$$

这里用向量表示所有的发电机转速、非线性项和外部扰动的集合: $\omega(t) = [\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_N]^T \in \mathbb{R}^N$, $f(\omega) = [f_1(\omega_1) \ f_2(\omega_2) \ \cdots \ f_N(\omega_N)]^T \in \mathbb{R}^N$, $d(t) = [\frac{d_1(t)}{M_1} \ \frac{d_2(t)}{M_2} \ \cdots \ \frac{d_N(t)}{M_N}]^T \in \mathbb{R}^N$.

3.2 多电机系统动力学模型

本文设计的分布式固定时间控制器目标是使所有同步发电机的转子转速在固定时间内逐渐趋于额定转速, 即

$$\lim_{t \rightarrow T_{\max}} \omega_i = \omega_0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

在此多机系统中设置一个虚拟领导者节点, 且该虚拟发电机转子速度为额定转速, 即 $\omega_0 = \omega_0^{\text{act}} - \omega_N = 0$. 借助虚拟领导节点状态的独特性, 可以让所有发电机在理论上都可以获取领导者的信息。

本文基于Artstein变换模型^[17], 设计以下系统简化方法的变换. 该方法的作用是将含有输入时延的系统模型转化为不含输入时延的模型. 接下来简单介绍此变换方法, 参考文献[25-26]的处理方式. 考虑含有输入时延的系统(8), 令

$$y_i(t) = \omega_i(t) + \int_{t-\tau_i}^t \frac{u_i(T)}{M_i} dT, \quad (10)$$

其状态变量 $y_i(t)$ 微分形式如下:

$$\dot{y}_i(t) = f_i(\omega_i) + \frac{d_i(t)}{M_i} + \frac{u_i(t)}{M_i}. \quad (11)$$

由Artstein变换可知, 若控制器 $u(t)$ 能稳定变换后的系统(11), 则在一定输入时延 $\tau \in (0, \tau_{\max})$ 内, 控制器 $u(t - \tau)$ 也能稳定变换前的系统(8).

定义发电机 i 的状态与其邻居状态误差变量为

$$e_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(y_i(t) - y_j(t)) + b_i y_i(t), \quad (12)$$

其中一致性误差 $e_i \in \mathbb{R}$. 由定义可知有

$$e(t) = Hy(t), \quad (13)$$

式中: $e(t) = [e_1(t) \ e_2(t) \ \cdots \ e_N(t)]^T \in \mathbb{R}^N$, $y(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \ \cdots \ y_N(t)]^T \in \mathbb{R}^N$.

假设 1 无向图 G 是连通的。

假设 2 在多机系统中有一个状态 $\omega_0 = 0$ 的虚拟领导发电机。

假设 3 由实际情况可知发电机模型中的非线性项 $f_i(\omega_i)$ 和扰动 $d_i(t)$ 都是有界值, 且满足

$$|f_i(\omega_i) + \frac{d_i(t)}{M_i}| \leq \bar{d} < +\infty, \quad (14)$$

针对上述问题, 本文基于多智能体系统固定时间一致性理论^[16], 在考虑了控制器的输入延时和外部干扰下, 提出一种分布式固定时间控制策略, 通过控制分布式储能装置来改善智能电网暂态稳定性和抗干扰能力. 所设计的控制器为

$$u_i(t) = M_i(-\alpha e_i^p(t) - \beta e_i^q(t) - \gamma \text{sat } e_i(t)), \quad (15)$$

式中: α, β 均为大于零的正常数; $p \in (1, +\infty)$; $q \in (0, 1)$; γ 为大于零的可调参数。

饱和函数 $\text{sat } x$ 定义如下:

$$\text{sat } x = \begin{cases} \frac{x}{\varepsilon}, & |x| \leq \varepsilon, \\ \text{sgn } x, & |x| > \varepsilon, \end{cases} \quad (16)$$

注意, 这里的 ε 是个很小的常数, 可以根据实际情况进行选择。

1) 当 $|e_i(t)| > \varepsilon$ 时, 分布式控制器为如下形式:

$$u_i = M_i(-\alpha e_i^p(t) - \beta e_i^q(t) - \gamma \text{sgn } e_i(t)). \quad (17)$$

定理 1 在上述假设和分布式固定时间控制协议(17)下, 满足以下条件的情况时, 系统(11)可以在固定时间内追随到领导者的状态, 达到渐近一致性。

$$\bar{d} \leq \gamma, \quad (18)$$

且收敛时间为

$$T(y) \leq T_{\max} = \frac{1}{a(\bar{p} - 1)} + \frac{1}{b(1 - \bar{q})}. \quad (19)$$

证 构造以下李雅普诺夫函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} y^T(t) H y(t), \quad (20)$$

对 $V(t)$ 进行时间 t 求导可求得如下过程:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \frac{1}{2} \dot{y}^T(t) H y(t) + \frac{1}{2} y^T(t) H \dot{y}(t) = \\ &= y^T(t) H \dot{y}(t) = \\ &= y^T(t) H (f(\omega) + d(t) - \alpha e^p(t) - \\ &\quad \beta e^q(t) - \gamma \text{sgn } e(t)), \end{aligned} \quad (21)$$

因为 H 是对称矩阵, 所以

$$y^T(t)H = (Hy(t))^T = e(t)^T = [e_1(t) \ e_2(t) \ \cdots \ e_N(t)],$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^N e_i(t)(f_i(\omega_i) + \frac{d_i(t)}{M_i} - \alpha e_i^p(t) - \beta e_i^q(t) - \gamma \operatorname{sgn} e_i(t)) \leq \\ &= -\alpha \sum_{i=1}^N e_i^{p+1}(t) - \beta \sum_{i=1}^N e_i^{q+1}(t) - \gamma \sum_{i=1}^N |e_i(t)| + \sum_{i=1}^N |e_i(t)| |f_i(\omega_i) + \frac{d_i(t)}{M_i}| \leq \\ &= -\alpha \sum_{i=1}^N (e_i^2(t))^{\frac{p+1}{2}} - \beta \sum_{i=1}^N (e_i^2(t))^{\frac{q+1}{2}} + \sum_{i=1}^N |e_i(t)| (\bar{d} - \gamma) \leq \\ &= -\alpha \sum_{i=1}^N (e_i^2(t))^{\frac{p+1}{2}} - \beta \sum_{i=1}^N (e_i^2(t))^{\frac{q+1}{2}} \leq \\ &= -\alpha N^{\frac{1-p}{2}} \left(\sum_{i=1}^N e_i^2(t) \right)^{\frac{p+1}{2}} - \beta \left(\sum_{i=1}^N e_i^2(t) \right)^{\frac{q+1}{2}}, \end{aligned} \tag{22}$$

再由引理1可得

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N e_i^2(t) &= (H^{\frac{1}{2}}y(t))^T H (H^{\frac{1}{2}}y(t)) \geq \lambda_2(H)y^T(t)Hy(t), \\ \sum_{i=1}^N e_i^2(t) &= (H^{\frac{1}{2}}y(t))^T H (H^{\frac{1}{2}}y(t)) \leq \lambda_N(H)y^T(t)Hy(t), \end{aligned}$$

故有

$$2\lambda_2(H)V(t) \leq \sum_{i=1}^N e_i^2(t) \leq 2\lambda_N(H)V(t), \tag{23}$$

其中: $\lambda_2(H)$ 为参数矩阵 H 的第2小特征值; $\lambda_N(H)$ 为最大特征值.

将式(23)代入式(22)中可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -\alpha N^{\frac{1-p}{2}} (2\lambda_2(H)V(t))^{\frac{p+1}{2}} - \beta (2\lambda_2(H)V(t))^{\frac{q+1}{2}} \leq \\ &= -aV^{\tilde{p}}(t) - bV^{\tilde{q}}(t), \end{aligned} \tag{24}$$

其中: $\alpha = aN^{\frac{p-1}{2}}(2\lambda_2(H))^{-\frac{p+1}{2}}$; $\tilde{p} = \frac{p+1}{2}$; $\beta = b(2\lambda_2(H))^{-\frac{q+1}{2}}$; $\tilde{q} = \frac{q+1}{2}$.

再由引理1可知: 系统(11)在控制器(17)下可以在

一个固定时间内达到跟踪一致. 且收敛时间为

$$T(y) \leq T_{\max} = \frac{1}{a(\tilde{p}-1)} + \frac{1}{b(1-\tilde{q})},$$

可知, 当 $t=T(y) \leq T_{\max} = \frac{1}{a(\tilde{p}-1)} + \frac{1}{b(1-\tilde{q})}$ 时, 系统 $y(t)$ 将实现固定时间领导跟随一致. 这时控制力 $u_i(t)$ 将会收敛为0, 则再经过一个延时 τ_i , 即当 $t = \frac{1}{a(\tilde{p}-1)} + \frac{1}{b(1-\tilde{q})} + \tau_i$ 时, $\int_{t-\tau_i}^t \frac{u_i(T)}{M_i} dT$ 将会为0. 那么, 当时间 $T_1 = T(y) \leq T_{\max} + \tau_{\max}$, 则 $\lim_{t \rightarrow T_1} y(t) = \omega(t)$. 因此, 同步发电机转子转速 $\omega(t)$ 在所设计的控制协议(17)下可以逐渐趋于额定频率, 其时间收敛满足

$$T_1 = T(y) \leq T_{\max} = \frac{1}{a(\tilde{p}-1)} + \frac{1}{b(1-\tilde{q})} + \tau_{\max}. \tag{25}$$

证毕.

根据理论证明, 值得注意的是, 在系统能承受的故障大小范围内, 所设计的控制器收敛时间的界限与初始状态条件无关. 这一特点为估计系统稳定时间带来了极大的方便, 如果需要收敛时间, 可以很容易地根据式(25)调整控制器增益来解决一致性跟踪问题, 很好地满足严格的收敛时间要求.

2) 当 $|e_i(t)| \leq \varepsilon$ 时, 分布式控制器为如下形式:

$$u_i(t) = M_i(-\alpha e_i^p(t) - \beta e_i^q(t) - \gamma \frac{e_i(t)}{\varepsilon}). \tag{26}$$

定理2 在上述所有假设和定理1成立下, 系统(11)将在分布式固定时间控制器(26)下达成一致, 如果满足以下条件:

$$y^T(t)Hy(t) \geq 2\left(\frac{N\bar{d}\varepsilon}{4\sqrt{ab}}\right)^{\frac{4}{p+q+2}}, \tag{27}$$

且收敛时间满足

$$T_3 \leq 3T_{\max}.$$

证 当经过时间 $t(t \leq T_{\max})$ 之后, 变量 $e_i(t)$ 将会满足 $|e_i(t)| \leq \varepsilon$, 根据定理1的证明过程有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq \sum_{i=1}^N |e_i(t)| |f_i(\omega_i) + \frac{d_i(t)}{M_i}| - \gamma \sum_{i=1}^N e_i(t) \operatorname{sat} e_i(t) - \alpha \sum_{i=1}^N e_i^{p+1}(t) - \beta \sum_{i=1}^N e_i^{q+1}(t) \leq -\alpha \sum_{i=1}^N (e_i^2(t))^{\frac{p+1}{2}} - \beta \sum_{i=1}^N (e_i^2(t))^{\frac{q+1}{2}} + \sum_{i=1}^N |e_i(t)| \bar{d} - \gamma \sum_{i=1}^N \frac{e_i^2(t)}{\varepsilon} \leq \\ &= -\alpha N^{\frac{1-p}{2}} \left(\sum_{i=1}^N e_i^2(t) \right)^{\frac{p+1}{2}} - \beta \left(\sum_{i=1}^N e_i^2(t) \right)^{\frac{q+1}{2}} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^N (|e_i(t)|\bar{d} - \frac{\bar{d}}{\varepsilon} e_i^2(t)) \leq \\
& -\alpha N^{\frac{1-p}{2}} (2\lambda_2(H)V(t))^{\frac{p+1}{2}} - \\
& \beta (2\lambda_2(H)V(t))^{\frac{q+1}{2}} + \\
& \sum_{i=1}^N (|e_i(t)|\bar{d} - \frac{\bar{d}}{\varepsilon} e_i^2(t) - \frac{\varepsilon\bar{d}}{4}) + \frac{\varepsilon N\bar{d}}{4} \leq \\
& -\frac{a}{2} V^{\frac{p+1}{2}}(t) - \frac{b}{2} V^{\frac{q+1}{2}}(t) + \frac{1}{4}(\varepsilon Nd - \\
& 2aV^{\frac{p+1}{2}}(t) - 2bV^{\frac{q+1}{2}}(t)), \quad (28)
\end{aligned}$$

所以,只需要满足

$$2aV^{\frac{p+1}{2}}(t) + 2bV^{\frac{q+1}{2}}(t) > \varepsilon Nd, \quad (29)$$

则有

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{a}{2} V^{\frac{p+1}{2}}(t) - \frac{b}{2} V^{\frac{q+1}{2}}(t), \quad (30)$$

由式(23)可知,有

$$2aV^{\frac{p+1}{2}}(t) + 2bV^{\frac{q+1}{2}}(t) \geq 4\sqrt{ab}V^{\frac{p+q+1}{4}}(t),$$

若

$$4\sqrt{ab}V^{\frac{p+q+1}{4}}(t) \geq \varepsilon Nd,$$

即

$$y^T(t)Hy(t) \geq 2\left(\frac{N\bar{d}\varepsilon}{4\sqrt{ab}}\right)^{\frac{4}{p+q+2}},$$

所以,当满足条件式(27)时,则式(30)成立.且根据引理2其收敛时间满足

$$T(y) \leq T_{\max} = \frac{2}{a(\bar{p}-1)} + \frac{2}{b(1-\bar{q})} = 2T_{\max}.$$

故系统(11)在控制器(26)下整体收敛时间满足

$$t \leq 3T_{\max},$$

同理,系统(8)中的所有同步发电机的转子转速在此分布式固定时间控制器(28)下收敛时间满足

$$\begin{aligned}
T_2 & \leq 3T_{\max} + \tau_{\max} = \\
& 3\left(\frac{1}{a(\bar{p}-1)} + \frac{1}{b(1-\bar{q})}\right) + \tau_{\max}.
\end{aligned}$$

证毕.

如果直接用控制协议(17),由于符号函数的存在,会造成控制器开关频率过高,可能会导致实际应用中出现抖振等不良现象.为了改善这一缺点,可以使用饱和函数代替符号函数.

4 仿真实例

本节将所提出的分布式固定时间控制器投入新英格兰39节点测试系统^[27]中进行仿真分析,该测试系统有39条母线、10台同步发电机,本节将进行该系统的暂态稳定性测试.此测试系统的详细数据可参考文献^[27],其系统拓扑结构如图1所示.由第2.1节电力系

统通信拓扑建模方法,可确定该系统的通信拓扑图和邻接矩阵矩阵,如图2所示.

借助本文虚拟领导者状态的独特性,可知领导者邻接矩阵为 $B = \text{diag}\{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$, 由 $H = L + B$, 可算出 H 矩阵,进一步可求得 $\lambda_2(H) = 1.16$; 其它分布式固定时间控制协议参数设置如下: $\alpha = 12, \beta = 8, p = 1.1, q = 0.9$. 由此可记算出 $a = 25.9, b = 17.8$. 考虑输入延时 $\tau = 20$ ms, 在暂态稳定性测试中分布式储能装置的容量设置为额定机械功率的20%. 本文中控制协议中的饱和函数 ε 值取0.01, 收敛时间可计算得

$$T(y) \leq 3T_{\max} = 3\left(\frac{2}{a(p-1)} + \frac{2}{b(1-q)}\right) = 5.7 \text{ s}.$$

然而,在控制器的实际应用过程中会受到许多因素限制,比如控制器的输入延时、噪音干扰、分布式储能装置最大输出容量限制,以及系统故障持续的时间等.因此,设计的控制器必须要克服这些限制才能保证其稳定系统的性能,为了得到本文控制器的优缺点,将本文控制器与CPI控制器、PFL控制器和文献^[15]控制器进行比较.在比较过程中,电力系统励磁稳定器(power system stabilizer, PSS)处于关闭状态,本文将从暂态稳定性测试、分布式储能装置最大输出容量限制、控制器输入延时、噪音干扰和故障持续时间,这5个方面进行仿真研究.

4.1 暂态稳定性测试

在本文中稳定状态时间标准的定义与文献^[10]中的标准相同,同步发电机转速与额定转速的偏差在额定转速0.1%之内,即在正负0.06 Hz的误差范围内认为系统是稳定的.在本次仿真中,当 $t = 0.5$ s时,线路16-17侧出现三相接地短路故障, $t = 0.6$ s时清除故障来源,100 ms后控制器开始加入使用,本次实验系统的PSS处在关闭状态.

图3(a)-(b)给出的是在本文提出的分布式固定时间控制器的作用下发电机转子的动态曲线,从图3(a)可以看出本文提出的控制器作大约经过2 s就能使故障后的系统恢复稳定运行,从图3(b)中可以看出各发电机的功角也能快速的恢复到初始稳定运行状态.图3(c)中反映了分布式控制器的输入功率,从图中可以看出,当发电机转子状态达到一致时,该分布式控制器的输入功率也逐渐收敛为0,体现控制器良好的性能.

为了体现文中所提出的分布式固定时间控制方法的优劣势,与CPI控制器、PFL控制器和文献^[15]控制器进行了对比.CPI控制器的模型可以表示为

$$u_i^{\text{CPI}} = \alpha_{\text{CPI}}(\hat{\omega}_i - \omega_i), \quad (31)$$

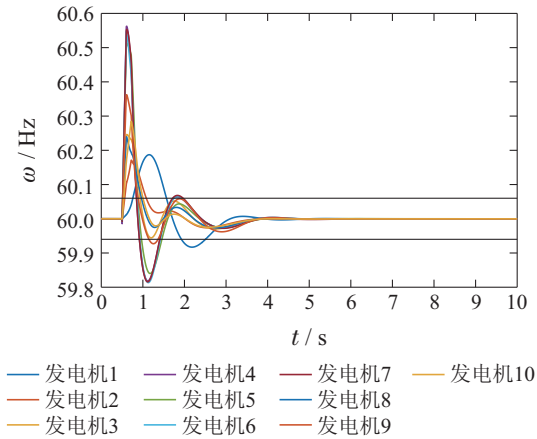
$$\hat{\omega}_i' = \beta_{\text{CPI}}(\omega^* - \frac{1}{N} \sum_{i \in N_i} \omega_i), \quad (32)$$

其中: $\omega^* = 0$; 设置参数 α_{CPI} 为15; β_{CPI} 为0.8, 后两者

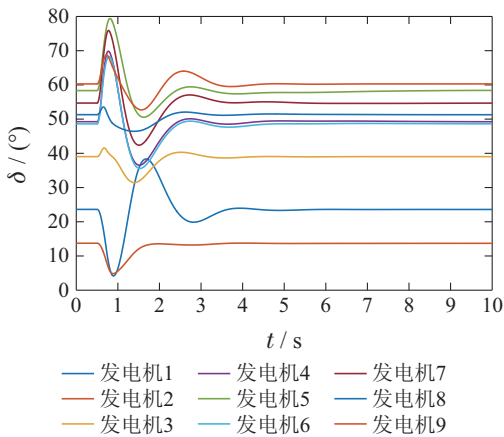
控制器相对应参数与文献[15]描述的一致。

4.2 分布式储能装置的最大输出容量限制

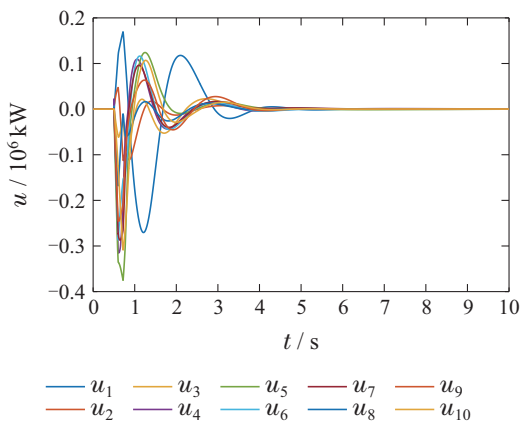
由于在实际中控制器 $u_i(t)$ 的性能会受到储能装置功率输出容量(P_{\max})的影响, 故在设计控制器时应要考虑这一限制条件, 本文定义分布式储能装置的最大输出容量定义为 $P_{\max,i} = \rho P_{mi}$.



(a) 转子转速响应



(b) 转子功角响应



(c) 控制器的输入功率分布

图 3 本文策略下发电机动态及控制器输入功率

Fig. 3 Generator dynamics and controller input power under this strategy

从图4可以看出4种控制器在 $8\% \leq \rho \leq 20\%$ 时, 控

制效果基本不受储能装置容量的限制, 能使系统快速地恢复稳定运行状态. 随着储能装置最大输出容量的降低, 本文控制器与其它3种控制器使系统恢复稳定运行的时间相差越来越大. 当分布式储能装置的最大输出容量限制为1.5%时, 其他3种控制器均不能使系统稳定. 这说明本文控制器受低容量储能装置的影响较小, 相比其它控制器在此条件下稳定系统的性能更好.

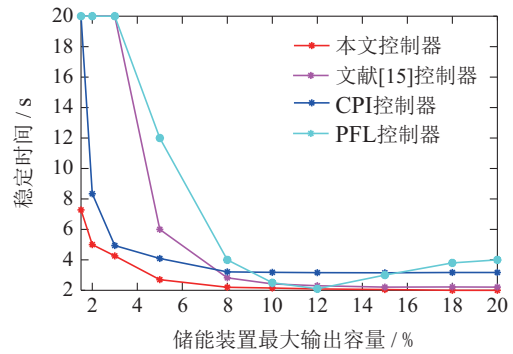


图 4 不同容量限制下稳定系统的时间

Fig. 4 Stabilization time under different capacity limits

4.3 输入延时

由于数据传输和接收后处理的不理想, 在海量的数据中经常出现时延, 时间延时会影响闭环系统的性能, 甚至可能破坏系统稳定性. 因此, 输入延时对控制器性能来说是非常重要的限制条件. 本次比较只与考虑了延时的控制器做对比, 接下来用仿真验证本文控制器与文献[15]控制器在不同输入延时下稳定系统的性能.

从图5可知, 当分布式储能装置输出容量 $\rho = 20\%$ 时, 随着输入延时的增大, 本文控制器稳定系统的效果逐渐不如文献[15]控制器. 不过随着分布式储能装置输出容量的下降, 当 $\rho = 5\%$ 时, 在不同时延下文献[15]控制器比本文控制器稳定系统的时间慢的多, 这也间接的验证了第4.2节中本文的控制器在低容量储能装置下性能更好的结论.

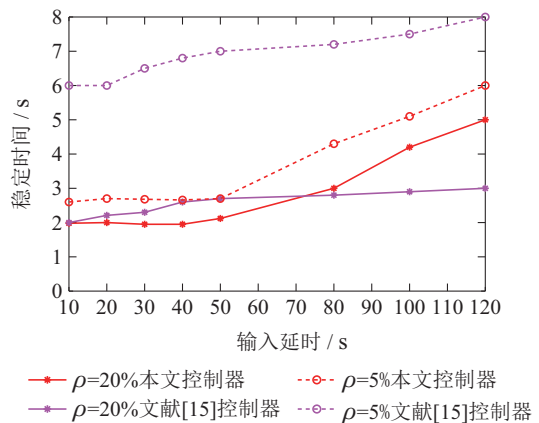


图 5 不同输入延时下稳定系统的时间

Fig. 5 Stabilization time under different input delays

4.4 噪声干扰

信息的传输过程中无法避免噪声的干扰,所以,设计的控制器应该能承受一定的噪声影响.本文通过在不同信噪比(signal to noise ratio, SNR)下控制器稳定系统的时间来类比外部干扰下控制器的性能表现.将式(6)的动力学方程中注入高斯白噪声 $d_i(t)$,通过信噪比来描述数据的噪声水平.通常可以用 $10 \lg(P_S/P_N)$ 表示,单位为dB,其中 P_S 为信号功率, P_N 为噪声功率.

图6表示4种控制器 $\rho = 20\%$ 时,不同信噪比下控制器稳定系统的时间,结果表明4种控制器均会受大噪声的干扰.在信噪比大于10 dB时,4种控制器均能快速的稳定系统,其性能相似.随着噪声的增大,当信噪比在4~10 dB范围内,本文控制器相比其它3种控制器在外部干扰下性能更有优势.

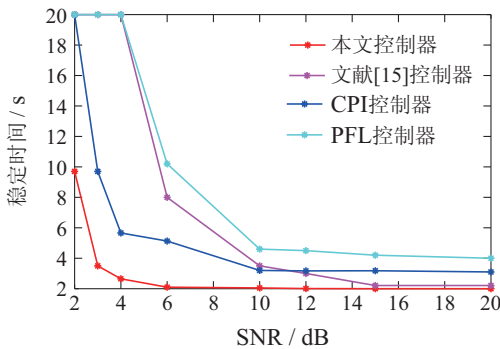


图6 不同信噪比下稳定系统的时间

Fig. 6 Stabilization time under different signal noise ratio

4.5 故障持续时间的影响

在电力系统暂态稳定控制中,研究故障持续的时间是很有意义的.在实际的电力系统运行工况中,断路器切除的故障的时间会受到一些不利条件的影响,如互感器的误差、整定计算的误差、短路电流的非周期分量的影响等.这些都会导致故障持续的时间不同,故障持续时间越长会导致发电机转子转速偏移越大,即故障持续的时间越长对系统造成的损害越大.故所设计的控制器应在不同故障持续时间下要及时稳定系统.

图7描述了4种控制器在不同故障持续时间下稳定系统的时间.当分布式储能装置输出容量限制 $\rho = 20\%$ 时,PFL控制器受故障持续时间的影响最大,文献[15]控制器能稳定故障持续时间200 ms之内的系统,随着故障持续时间越长本文控制器明显要比其他3种控制器稳定系统的时间要短,即在一定故障持续时间内控制器稳定系统的性能表现更好.同时也验证了本文理论证明部分,在系统能承受的故障大小范围内,发电机转子转速恢复稳定运行的时间与控制器开始投入时转子转速的初始状态无关,即控制器性能与故障的大小无关,只与控制协议的设置参数相关,

充分体现了本文分布式固定时间控制器的优点.

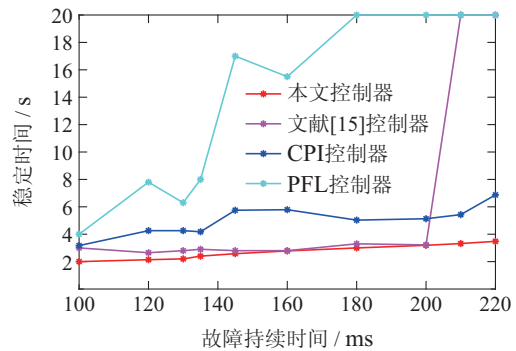


图7 不同故障持续时间下稳定系统的时间

Fig. 7 Stabilization time under different fault duration

5 结论

本文提出了一种分布式固定时间控制策略,通过控制分布式储能装置向发电机母线注入或吸收功率来改善电力系统的暂态稳定性和抗干扰性.同时,基于Artstein变换,设计一种简化方法解决了分布式储能装置控制中输入延时的影响.并且,设计控制器时考虑一些限制控制器性能的因素,如输入延时、储能装置的容量限制、外部干扰、系统故障持续时间等.通过在新英格兰39节点测试系统中,将本文控制器与其它3种控制器对比,突出了本文控制器的优点:在低容量储能装置限制下和有外部干扰的情况下,本文控制器性能更好,并且该策略提高了系统在故障持续时间不确定下的暂态稳定性.本文的策略可以更好的在实际工程中应用,使电力系统稳定运行的更可靠.

参考文献:

- [1] ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power system's highly penetrated by new energy generation. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(11): 3498 – 3507. (张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析. *中国电机工程学报*, 2020, 40(11): 3498 – 3507.)
- [2] LIU Jizhen, WANG Wei, HU Yang, et al. Control and optimization of alternate electrical power system with renewable energy sources. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(12): 1555 – 1561. (刘吉臻, 王玮, 胡阳, 等. 新能源电力系统控制与优化. *控制理论与应用*, 2016, 33(12): 1555 – 1561.)
- [3] CHAKHCHOUKH Y, VITTAL V, HEYD G T. PMU based state estimation by integrating correlation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(2): 617 – 626.
- [4] KAWABE K, YOKOYAMA A. Improvement of transient stability and short-term voltage stability by rapid control of batteries on EHV network in power systems. *Electrical Engineering in Japan*, 2014, 188(3): 1 – 10.
- [5] FOMBU A M, KENNE G, NGUIMFACK-NDONGMO J D, et al. Decentralized nonlinear coordinated excitation and steam valve adaptive control for multi-machine power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 75: 117 – 126.
- [6] MENG Qingwei, WANG Ziqiang. Decentralized coordinated control for power system based on communication topology. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(8): 2315 – 2322.

- (孟庆伟, 王子强. 考虑通讯拓扑的电力系统分散协调控制器设计. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2315 – 2322.)
- [7] XIANG J, HILL D J, MA J. Distributed power control for transient stability of multimachine power systems. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2017, 7(3): 383 – 392.
- [8] TU G, LI Y, XIANG J, et al. Distributed power system stabiliser for multimachine power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(5): 603 – 612.
- [9] ANDREASSON M, DIMAROGONAS D V, SANDBERG H, et al. Distributed control of networked dynamical systems: Static feedback, integral action and consensus. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(7): 1750 – 1764.
- [10] FARRAJ A, HAMMAD E, KUNDUR D. A cyber-enabled stabilizing control scheme for resilient smart grid systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(4): 1856 – 1865.
- [11] FARRAJ A, HAMMAD E, KUNDUR D. A distributed control paradigm for smart grid to address attacks on data integrity and availability. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 2018, 4(1): 70 – 81.
- [12] XU Y L, ZHANG W, CHOW M Y, et al. A distributed model-free controller for enhancing power system transient frequency stability. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(3): 1361 – 1371.
- [13] CHEN Shiming, LU Jiasheng, GAO Yanli. Neural network based distributed adaptive control for power system transient stability. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 1407 – 1414.
(陈世明, 卢家胜, 高彦丽. 基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制. 控制与决策, 2021, 36(6): 1407 – 1414.)
- [14] WANG Ziqiang, WANG Jie. A distributed control considering the cyber-physical characteristics of smart grid. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(23): 6921 – 6933.
(王子强, 王杰. 一种计及智能电网信息物理特性的分布式控制器. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6921 – 6933.)
- [15] AYAR M, TRVIZAN R D, BRETAS A S, et al. A distributed control approach for enhancing smart grid transient stability and resilience. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 3035 – 3044.
- [16] LIU J, YU Y, SUN J, et al. Distributed event-triggered fixed-time consensus for leader-follower multi-agent systems with nonlinear dynamics and uncertain disturbances. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2018, 28(11): 3543 – 3559.
- [17] ARTSTEIN Z. Linear systems with delayed controls. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1982, 27(4): 869 – 879.
- [18] FILIPPOV A. *Differential Equations with Discontinuous Right Hand Side*. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [19] ZUO Z, TIAN B, DEFOORT M, et al. Fixed-time consensus tracking for multiagent systems with high-order integrator dynamics. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 63(2): 563 – 570.
- [20] CHEN Shiming, LI Lichao. Fixed-time consensus of nonlinear stochastic multi-agent systems. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(4): 540 – 546.
(陈世明, 黎力超. 非线性随机多智能体系统的固定时间一致性. 控制理论与应用, 2021, 38(4): 540 – 546.)
- [21] CHENG Y, SHI B, LIU H. An improved class of fixed-time consensus protocols for multi-agent systems. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 2020, 63(1/2): 439 – 454.
- [22] CHEN Shiming, SHAO Sai. Distributed event-triggered fixed-time consensus control for multi-agent systems with nonlinear uncertainties. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(10): 1606 – 1614.
(陈世明, 邵赛. 基于事件触发非线性多智能体系统的固定时间一致性. 控制理论与应用, 2019, 36(10): 1606 – 1614.)
- [23] CHAPMAN J W, ILIC M D, KING C A, et al. Stabilizing a multimachine power system via decentralized feedback linearizing excitation control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, 8(3): 830 – 839.
- [24] ANDERSON P M, FOUAD A A. *Power System Control and Stability*. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press, 2003.
- [25] LIU J, ZHANG Y, SUN C, et al. Fixed-time consensus of multi-agent systems with input delay and uncertain disturbances via event-triggered control. *Information Sciences*, 2019, 480: 261 – 272.
- [26] LIU J, YU Y, XU Y, et al. Fixed-time average consensus of nonlinear delayed mass under switching topologies: An event-based triggering approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 52(5): 2721 – 2733.
- [27] MOEINI A, KAMWA I, BRUNELLE P, et al. Open data IEEE test systems implemented in SimPowerSystems for education and research in power grid dynamics and control. *The 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. Stoke on Trent, UK: IEEE, 2015: 1 – 6.

作者简介:

陈世明 博士, 教授, 目前研究方向为多智能体系统、复杂网络理论、优化算法, E-mail: c1977318@hotmail.com;

余翔 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: yx9527662022@163.com;

张微 硕士研究生, 目前研究方向为电力信息物理系统建模, E-mail: 2030418945@qq.com;

刘江 硕士研究生, 目前研究方向为多智能体系统协调控制, E-mail: 1727959493@qq.com;

钱成龙 硕士研究生, 目前研究方向为多智能体系统协调控制, E-mail: 2976694705@qq.com.