

控制与决策

Control and Decision

一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

陈世明, 韩红泉

引用本文:

陈世明, 韩红泉. 一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 1849–1854.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略](#)

Voltage equalization strategy for series-connected ultracapacitors based on cooperative control

控制与决策. 2021, 36(8): 1997–2001 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1736>

[孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制](#)

Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid

控制与决策. 2021, 36(8): 2034–2041 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0012>

[基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制](#)

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability

控制与决策. 2021, 36(6): 1407–1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

[脉冲控制下多智能体系统的保性能双向编队控制](#)

Guaranteed cost bipartite formation problem of multi-agent systems with impulse control

控制与决策. 2021, 36(1): 180–186 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0854>

[自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性](#)

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

陈世明[†], 韩红泉

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

摘要: 将储能技术作为新兴调节功率的手段引入智能电网, 为保障电网平稳运行提供新的思路. 考虑到电力系统的暂态稳定问题与蜂拥控制问题的相似性, 针对电力系统遭遇故障后恢复暂态稳定的控制问题, 提出一种新的基于蜂拥算法的非线性分布式控制方案, 该方案利用电机动力学方程中非线性项与系统频率之间的关系, 引入系统状态反馈项以加快系统恢复暂态稳定性, 通过外部储能设备对系统故障实施控制. 最后, 将该控制器应用在 IEEE 新英格兰 39 节点电力系统模型中, 仿真结果验证了该控制器具有快速性、可实施性, 并进一步验证了所设计的控制器在储能设备低容量条件下的有效性.

关键词: 智能电网; 蜂拥算法; 分布式控制; 外部储能; 暂态稳定; 多智能体系统

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1696

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 陈世明, 韩红泉. 一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(8): 1849-1854.

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model

CHEN Shi-ming[†], HAN Hong-quan

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

Abstract: Energy storage technology is introduced into smart grids as a new means of power regulation, which provides a new way to ensure the smooth operation of the grid. A new nonlinear distributed scheme based on the flocking algorithm is presented to solve the transient stability control problem when a power system fails. In this scheme, by using the relation between the nonlinear term of the motor dynamics and the system frequency, the system state feedback term is introduced to speed up the restoration of transient stability of the system. System failure is controlled by the device of external energy storage. Finally, the proposed controller is applied to the IEEE New England 39-node power system model. Simulation results show that the proposed controller has advantages of higher speed and feasibility. Furthermore, the results verify the effectiveness of the proposed controller with a low capacity energy storage device.

Keywords: smart grids; flocking algorithm; distributed control; external energy storage; transient stability; multi-agent system

0 引言

信息测量及通信技术在电网中的应用, 以及非传统能源和新兴技术接入电网, 对电网的稳定可靠运行提出更高要求^[1]. 利用外部储能设备(energy storage systems, ESS)进行系统驱动的控制方案为改变电力系统动力学提供新的方法. 外部储能设备具有快速动作的特点, 在电网遭遇故障后, 能够实现控制器迅速响应的要求, 在电力故障造成更加严重的后果之前进行控制, 使得电力系统具有更好的稳定性和鲁棒性. 分布式暂态稳定控制策略注重系统中多智能体之间的合作与协调, 能够解决许多集中式^[2]

和分散式^[3]难以解决的大规模复杂优化控制问题, 发挥出智能电网的优势. 因此, 分布式控制在电力系统暂态稳定问题中的应用正在逐渐增多^[4-7]. 针对电网稳定性的应用, 已有众多学者提出新的分布式控制方案^[8-12]. Andreasson 等^[11]提出利用一致比例积分(consensus proportional integral, CPI)控制方案来影响发电机的机械功率, 从而实现一种分两级应用的自动频率控制策略; Farraj 等^[12]提出了一种参数反馈线性化(parameter feedback linear, PFL)控制器, 利用外部储能装置实现电网故障后的暂态稳定控制, 提高电网暂态稳定性.

收稿日期: 2019-12-03; 修回日期: 2020-04-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61973118); 江西省主要学科学术和技术带头人计划项目(20182BCB22009).

责任编辑: 孙秋野.

[†]通讯作者. E-mail: c1977318@hotmail.com.

近年来,多智能体系统的一致性问题已经得到了充分研究^[13-15].文献[16-17]研究了追踪虚拟领导者的蜂拥控制问题;文献[18]针对非线性多智能体系统,研究了具有时变时滞和虚拟领导者的蜂拥控制问题.电网中节点之间的连接关系具有多智能体结构的一般特征,越来越多的学者开始考虑将多智能体系统一致性问题与智能电网暂态稳定性问题进行类比研究.文献[19]采用多智能体一致性理论,针对电力系统中的跟踪控制问题进行研究;文献[20]提出了一种基于多智能体一致性算法,用以解决电力系统的分层控制和功率分配问题;文献[21]将电力系统动力学方程与蜂拥算法结合,针对严重干扰后的发电机同步问题,进行蜂拥控制的研究,然而在建立模型时未考虑电力系统各节点之间的影响权重问题;文献[6]采用集中式控制的方式,但没有考虑暂态稳定中的相角聚合问题.

结合上述问题,本文首先给出一种新的信息-物理融合系统建模方法.其次,充分考虑电力系统中的电气特性,将蜂拥算法与发电机动力学方程结合,提出一种新的非线性电力系统的分布式控制器.相比于现存的控制方法,所提方法不需要精确的系统参数,可以有效避免非线性项未知参数不准确的问题;其通过相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)接收电网的部分实时状态信息,并结合权重矩阵,实现局部信息交互;利用可控外部储能设备,向发电机母线中输出(或吸收)有功功率进行控制;利用Lyapunov稳定性理论,证明所提出的分布式控制算法能够在有限时间内实现系统收敛.最后,通过Matlab/Simulink仿真实验平台,验证所提出的控制器能够快速高效地实现电力系统暂态稳定恢复.

1 知识准备

通常,使用图论来描述一个多智能体系统.本文中,对于一个向量或矩阵 α , α^T 为其转置, $\|\alpha\|$ 为其欧几里德范数. $G = (V, E, A)$ 表示加权有向图.其中: $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 为节点的集合; $E = \{(i, j), i, j \in V\}$ 为边的集合; $A = (a_{ij})_{N \times N}$ 为权重邻接矩阵, a_{ij} 表示两个多智能体节点之间通讯联系中传递信息对这两个智能体影响的大小.当 $(i, j) \in E$ 时, $a_{i,j} \in (0, 1]$,否则 $a_{ij} = 0$. N_i 表示智能体 i 的邻居集合,由对其影响较大的智能体组成. $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ 为度矩阵,对角元素 $d_i = \sum_{j \neq i} a_{ij}$. $L = [l_{ij}]_{N \times N} = D - A \in R^{N \times N}$ 表示图 G 的拉普拉斯矩阵.若每对不同的节点之间都存在一条路径,则称该图为连通图.

引理1^[22] 拉普拉斯矩阵 L 的特征值满足 $0 = \lambda_1(L) \leq \lambda_2(L) \leq \dots \leq \lambda_N(L)$.当图 G 连通时,满足

$$\lambda_2(L) = \min_{\alpha \perp \mathbf{1}_n} \frac{\alpha^T L \alpha}{\|\alpha\|^2} > 0. \quad (1)$$

引理2^[22] 矩阵 L 是一个半正定矩阵,具有以下性质:

$$\alpha^T L \alpha = \frac{1}{2} \sum_{i,j \in E} a_{ij} (\alpha_i - \alpha_j)^2, \alpha \in R^n. \quad (2)$$

2 智能电网控制模型

2.1 系统建模

本节中,给出智能电网的分布式控制模型.如图1所示.其中,智能体由PMU测量单元、数据接收单元和本地控制器组成,用于状态信息的传递、处理.PMU将量测数据通过数据接收单元上传至本地控制器以及邻域控制器,并由本地控制器作出控制决策.物理网络由发电机、负荷以及可控的分布式储能设备组成.通过在每个发电机母线上配备一个外部储能设备来模拟电力系统中的储能设备的分布状态,外部储能设备的容量由相关发电机机械功率的百分比决定.

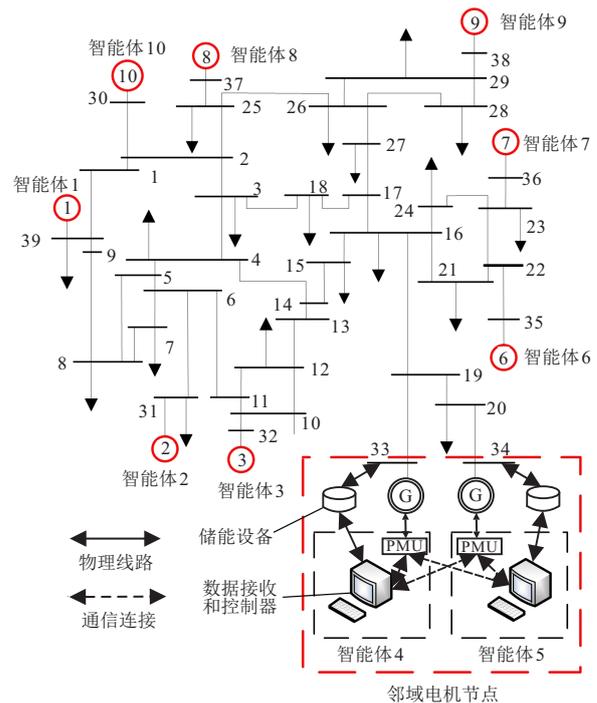


图1 新英格兰39节点系统分布式控制模型

2.2 电机动力学模型

在本文中,转子角速度定义为 $\omega_i = \omega_i^{\text{act}} - \omega_0$,单位为r/s, ω_i^{act} 表示发电机的实际转子转速, ω_0 表示发电机同步转速.将发电机 i 母线上外部储能设备的输出记为 u_i .因此,在存在外部储能设备的条件下,发电机 i 在 t 时刻的摆动方程^[23]为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i, \\ \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (P_{a,i} - D_i \omega_i + u_i). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\dot{\delta}_i$ 和 $\dot{\omega}_i$ 分别为发电机转子角 δ_i 和角速度 ω_i 对时间的导数, M_i 和 D_i 分别为电机惯性系数和阻尼系数, $P_{m,i}$ 和 $P_{e,i}$ 分别为电机机械输入功率和机械输出功率, $P_{a,i} = P_{m,i} - P_{e,i}$ 表示发电机 i 的加速功率.

令 $g(\delta_i, \omega_i) = \frac{1}{M_i}(P_{a,i} - D_i\omega_i)$, 表示系统的非线性部分, 则式(3)重写为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i, \\ \dot{\omega}_i = g_i(\delta_i, \omega_i) + \tilde{u}_i. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\tilde{u}_i = \frac{1}{M_i}u_i, i = 1, 2, \dots, N; \delta_i \in R^n$ 和 $\omega_i \in R^n$ 表示发电机 i 的相角和角速度状态; $\tilde{u}_i \in R^n$ 表示控制输入. 系统(4)中 $\tilde{u}_i > 0 (\tilde{u}_i < 0)$ 表示外部储能设备向发电机 i 的母线中注入(吸收)功率.

假设1 假设电力系统网络拓扑图是连通的.

假设2 $g_i(\delta_i, \omega_i)$ 对于 ω_i 是有界的, 存在常数 $h_i, i = 1, 2, \dots, N$, 使得^[24]

$$\|g_i(\delta_i, \omega_i)\| \leq h_i\|\omega_i\|. \quad (5)$$

2.3 基于蜂拥的控制协议设计

针对电力系统, 本文设计以下蜂拥控制协议:

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i = & - \sum_{j \in N_i} \nabla \Phi(\|\delta_i - \delta_j\|)n_{ij} - \\ & \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\omega_i - \omega_j) - k_i\omega_i, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $n_{ij} = (\delta_i - \delta_j)/\|\delta_i - \delta_j\|$.

定义1 定义势能函数

$$\Phi(x) = \begin{cases} \int_{-\frac{5}{9}\pi}^x \Theta(s)ds, & x \in [-\pi, -\frac{5}{9}\pi]; \\ 0, & x \in [-\frac{5}{9}\pi, \frac{5}{9}\pi]; \\ \int_{\frac{5}{9}\pi}^x \Theta(s)ds, & x \in (\frac{5}{9}\pi, \pi]. \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\Theta(\|\delta_{ij}\|) = \begin{cases} 0, & |\delta_{ij}| \leq 5\pi/9; \\ c\left(|\delta_{ij}| - \frac{5\pi}{9}\right)^2 e^{\frac{|\delta_{ij}| - 5\pi/9}{2}}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

c 为常数, 且 $c > 0; \delta_{ij} = \delta_i - \delta_j, (i, j) \in E$, 表示发电机 i 和发电机 j 之间的相对功角.

定义2 对于系统(3), 对于任意初始状态, 有:

1) $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\delta_{ij}(t)\| \leq \frac{5}{9}\pi$; 2) $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\omega_i(t) - \omega_j(t)\| = 0, \forall i, j = 1, 2, \dots, N$. 则蜂拥控制是渐近实现的.

3 收敛性分析与证明

定理1 对于系统(4), 在假设1和假设2成立条件下, 存在常数 $k_i > 0$, 且 k_i 满足

$$k_i \geq h_i, i = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

则控制协议(6)可以有效地解决系统的一致性问题.

证明 构造 Lyapunov 函数为

$$V = V_1 + V_2. \quad (10)$$

其中: $V_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \Phi(\|\delta_{ij}\|), V_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \omega_i^T \omega_i$, 且

Lyapunov 函数 V 为正值.

对 V_1 求导, 得

$$\dot{V}_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \frac{\partial \Phi(\|\delta_{ij}\|)}{\partial \delta_{ij}}. \quad (11)$$

由于人工势函数相对于 δ_{ij} 具有对称性, 有

$$\frac{\partial \Phi(\|\delta_{ij}\|)}{\partial \delta_{ij}} = \frac{\partial \Phi(\|\delta_{ij}\|)}{\partial \delta_i} = \frac{\partial \Phi(\|\delta_{ij}\|)}{\partial \delta_j},$$

故

$$\dot{V}_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \omega_i^T \Theta(\|\delta_{ij}\|)n_{ij}. \quad (12)$$

对 V_2 求导, 得

$$\dot{V}_2 = \sum_{i=1}^N \omega_i^T \dot{\omega}_i. \quad (13)$$

将式(4)和(6)代入(13), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & \sum_{i=1}^N \omega_i^T \left(g(\delta_i, \omega_i, t) - \sum_{j \in N_i} \Theta(\|\delta_{ij}\|)n_{ij} - \right. \\ & \left. \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\omega_i - \omega_j) - k_i\omega_i \right). \end{aligned} \quad (14)$$

将式(12)和(14)代入(10), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \omega_i^T \Theta(\|\delta_{ij}\|)n_{ij} + \\ & \sum_{i=1}^N \omega_i^T \left(g(\delta_i, \omega_i, t) - \sum_{j \in N_i} \Theta(\|\delta_{ij}\|)n_{ij} - \right. \\ & \left. \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\omega_i - \omega_j) - k_i\omega_i \right) \leq \\ & \sum_{i=1}^N \left(\|\omega_i^T\| \|g(\delta_i, \omega_i, t)\| - k_i\omega_i^T \omega_i - \right. \\ & \left. \omega_i^T \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\omega_i - \omega_j) \right). \end{aligned} \quad (15)$$

由 $\sum_{j \in N_i} a_{ij}(\omega_i - \omega_j) = \sum_{j=1}^N a_{ij}(\omega_i - \omega_j) = L\omega_i$, 以及式(5)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^N \left(h_i \|\omega_i^T\| \|\omega_i\| - k_i \omega_i^T \omega_i - \right. \\ & \left. \omega_i^T \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\omega_i - \omega_j) \right) = \\ & \sum_{i=1}^N (h_i - k_i) \omega_i^T \omega_i - \omega^T L \omega, \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $\omega = \text{col}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$. 由式(2)和(9)可知, $\dot{V} \leq 0$, 即 Lyapunov 函数 V 为非增函数, 证明该系统

在控制协议(6)的作用下是渐近稳定的. 智能体通过与其邻居个体的信息交互,可以实现期望的暂态稳定蜂拥控制目标,保障系统稳定运行. □

对于任意的 $t \geq 0$, 有 $V \leq V(0)$, 则存在不变集 $\Omega = \{(\delta^T, \omega^T)V(\delta^T, \omega^T) \leq V(0)\}$. 由LaSalle不变集原理可得, 存在最大不变集 $\Omega_1 = \{(\delta^T, \omega^T)V(\delta^T, \omega^T) = 0\}$, 因此有 $\omega_i = 0$, 即 $\omega_i^{act} = \omega_0$, 表示发电机 i 的频率收敛至额定频率, 任意两台发电机间功角差的绝对值小于 $5\pi/9$.

4 仿真结果

本文采用新英格兰39节点系统^[25], 将所提出的基于蜂拥算法的非线性分布式控制器在Matlab/Simulink平台中进行仿真验证, 电力系统拓扑如图1所示. 电力系统在59.95 r/s到60.06 r/s之间处于安全稳定运行状态; 在 $t = 0.5$ s时刻, 母线17(线路16-17侧)发生三相短路故障; 在 $t = 0.6$ s时刻, 清除故障. 实验1中不加入控制器, 仿真观察时间为3.5 s; 其余实验中, 在 $t = 0.7$ s时刻(100 ms后)激活所有控制器, 仿真观察时间为10 s. 在本文中, 发电机的转速误差在0.1%之内, 即发电机的转子速度处于59.94 r/s和60.06 r/s之间时, 认为系统进入稳定运行状态^[7].

4.1 控制器对系统稳定性的影响

实验1 故障发生后, 3.5 s时间内不对电力系统施加任何控制, 每台发电机的功角差和转速变化情况如图2、图3所示. 可知电网在遭遇较大故障后, 发电机转速波动较大, 转子角差值超过 $5\pi/9$, 系统暂态运行失稳, 平衡被破坏, 并面临崩溃风险.

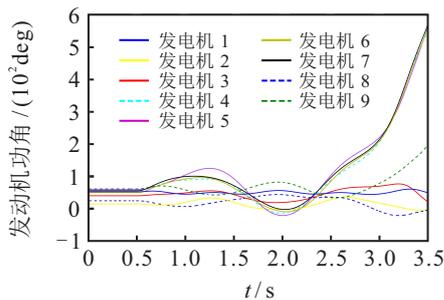


图2 未加控制时电机功角响应

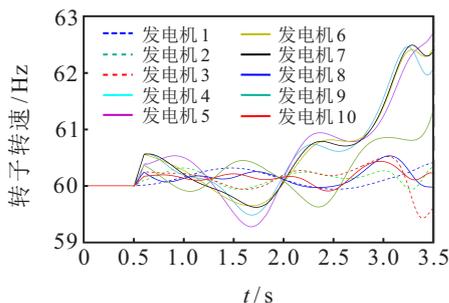


图3 未加控制时电机转速响应

实验2 电力系统励磁稳定器(power system

stabilizer, PSS)一直投入系统使用, 各发电机动态响应如图4、图5所示. 电力系统能够在7.2 s左右恢复暂态稳定, 所需时间较长, 不能够满足电网快速恢复暂态稳定的要求.

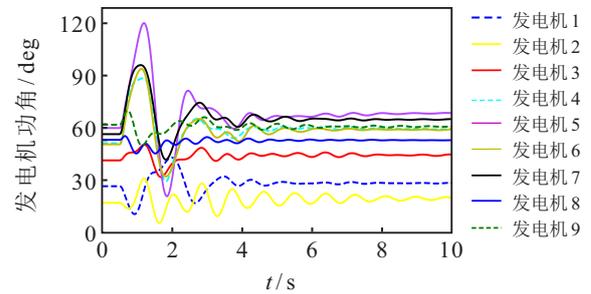


图4 加入PSS电机功角响应

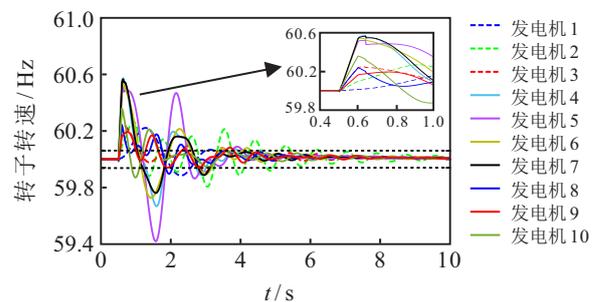


图5 加入PSS电机转速响应

实验3 在 $t = 0.7$ s激活所有控制器, 且PSS未投入系统使用, 系统中每台发电机的转子动态曲线如图6、图7所示.

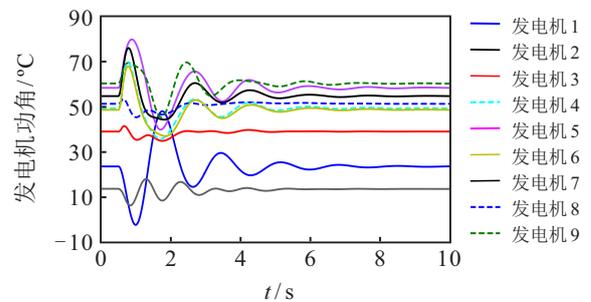


图6 加入本文控制器电机功角响应

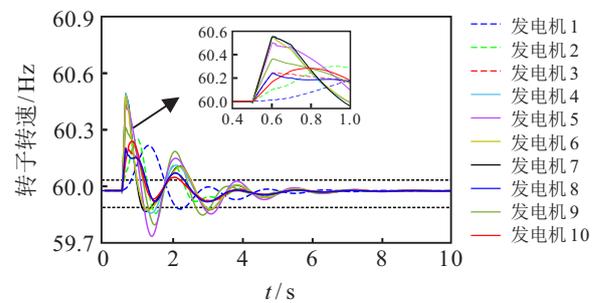


图7 加入本文控制器电机转速响应

图6、图7分别反映了10台发电机的功角和转速动态变化情况, 图8反映了系统的可控分布式外部储能设备总功率输出响应. 对比图2~图5可知, 本文所设计的控制器能够对系统暂态故障快速响应, 稳定时

间为2.8s左右,实现了系统短时间内恢复稳定运行的要求。

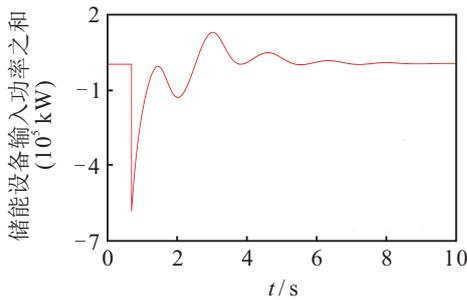


图8 外部储能总功率输出响应

4.2 考虑电网实际运行环境

实验4 由于外部储能设备最大输出容量的限制,故障响应的控制量是在一定范围内对系统进行调控,这将对电网恢复稳定造成一定影响.本实验仿真了外部储能设备的最大输出容量 $Q_i = \eta P_{m,i}$ 时, η 取不同值对系统稳定时间造成的影响,其中 η 为最大输出容量占相应母线发电机的额定功率百分比.观察容量限制对系统稳定时间的影响,并与文献[7]和文献[12]进行对比,则分布式可控储能设备控制量 \hat{u}_i 为

$$\hat{u}_i = \begin{cases} Q_i, & \tilde{u}_i > Q_i; \\ \tilde{u}_i, & \|\tilde{u}_i\| \leq Q_i; \\ -Q_i, & \tilde{u}_i < -Q_i. \end{cases} \quad (17)$$

仿真结果如图9所示:在 $\eta \geq 10\%$ 的条件下,3种控制器具有相似的稳定时间;在 $4\% \leq \eta \leq 10\%$ 的条件下,本文控制器能够在更短时间内使电力系统恢复稳定,文献[7]和PFL控制器^[12]稳定恢复时间较长;文献[7]和PFL控制器^[12]在 $\eta \leq 4\%$ 的条件下,在仿真时间20s内均不稳定,本文控制器在 $\eta \leq 2\%$ 的条件下,在仿真时间20s内不稳定.说明本文控制器在储能设备低容量的条件下控制效果更好。

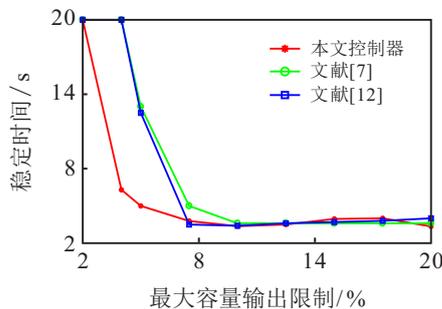


图9 不同容量限制下的系统稳定时间

5 结论

针对电力系统中的暂态稳定问题,本文提出了一种新的基于蜂拥算法的非线性控制器,通过PMU将本地信息与邻域信息结合,实现局部信息交互,控制器通过外部储能设备向电网中注入或吸收功率来影

响电力系统的动态特性,使电力系统在遭受严重干扰后,快速恢复相角聚合、频率一致,即电力系统暂态稳定运行.考虑到电网实际运行过程中,分布式可控外部储能设备的容量限制问题,本文设计了对应的仿真案例,仿真结果表明,该控制器不仅具有较强的稳定性和快速性,并且相对于文献[7]中的控制器和PFL控制器^[12],在外部储能设备容量低的情况下具有更好的控制效果。

本文基于蜂拥算法设计的控制器,在系统故障后能够快速恢复电力系统暂态稳定运行,仿真结果表明该控制方案简单可行.接下来的工作是在现有的信息物理融合系统框架下,针对不同的系统通信时延和网络信息攻击问题,对智能电网鲁棒性进行研究。

参考文献(References)

- [1] 余贻鑫,秦超.智能电网基本理念阐释[J].中国科学:技术科学,2014,44(6):695-701.
(Yu Y X, Qin C. Interpretation of basic concepts of smart grid[J]. Chinese Science: Technical Science, 2014, 44(6): 695-701.)
- [2] Tan K T, Peng X Y, So P L, et al. Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1977-1987.
- [3] 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[J].中国电机工程学报,2018,38(8):2315-2322.
(Meng Q W, Wang Z Q. Decentralized coordinated control for power system based on communication topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2315-2322.)
- [4] 康文发,李强,陈民铖,等.孤岛微电网多Agent分布式双层控制方法[J].中国电机工程学报,2018,38(3):770-781.
(Kang W F, Li Q, Chen M Y, et al. A two-layer distributed control method for islanded microgrids by using multi-agent systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 770-781.)
- [5] Farraj A, Hammad E, Kundur D. On the Use of energy storage systems and linear feedback optimal control for transient stability[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(4): 1575-1585.
- [6] Farraj A, Hammad E, Kundur D. A distributed control paradigm for smart grid to address attacks on data integrity and availability[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2018, 4(1): 70-81.
- [7] Ayar M, Obuz S, Trevizan R, et al. A distributed control approach for enhancing smart grid transient stability and resilience[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 3035-3044.
- [8] Vahidnia A, Ledwich G, Palmer E W. Transient

- stability improvement through wide-area controlled SVCs[J]. *IEEE Transactions Power Systems*, 2016, 31(4): 3082-3089.
- [9] 窦春霞, 李娜, 徐晓龙. 基于多智能体系统的微电网分散协调控制策略[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(7): 125-134.
(Dou C X, Li N, Xu X L. Decentralized coordinated control strategy of microgrid based on multi-agent system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(7): 125-134.)
- [10] Wei J, Kundur D, Zourntos T, et al. A flocking-based dynamical systems paradigm for smart power system analysis[C]. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego: IEEE, 2012: 1-8.
- [11] Andreasson M, Dimarogonas D V, Sandberg H, et al. Distributed control of networked dynamical systems: Static feedback and integral action and consensus[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(7): 1750-1764.
- [12] Farraj A, Hammad E, Kundur D. A cyber-enabled stabilizing control scheme for resilient smart grid systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(4): 1856-1865.
- [13] 陈世明, 化俞新, 祝振敏, 等. 邻域交互结构优化的多智能体快速蜂拥控制算法[J]. *自动化学报*, 2015, 41(12): 2092-2099.
(Chen S M, Hua Y X, Zhu Z M, et al. Multi-agent fast swarm control algorithm based on neighborhood interaction structure optimization[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(12): 2092-2099.)
- [14] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 49(9): 1520-1533.
- [15] Yin Y Y, Shi Y, Liu F, et al. Second-order consensus for heterogeneous multi-agent systems with input constraints[J]. *Neurocomputing*, 2019, 351: 43-50.
- [16] Su H S, Wang X F, Lin Z L. Flocking of multi-agents with a virtual leader[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(2): 293-307.
- [17] Su H S, Wang X F, Chen R G. A connectivity-preserving flocking algorithm for multi-agent systems based only on position measurements[J]. *International Journal of Control*, 2009, 82(7): 1334-1343.
- [18] Sun F, Wang R, Zhu W, et al. Flocking in nonlinear multi-agent systems with time-varying delay via event-triggered control[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 350: 66-77.
- [19] Ke Y, Chen Q G, Li Y, et al. Leader-following control of multi-motor systems based on the consistency theory under the network environment[C]. The 28th Control and Decision Conference. Yinchuan: IEEE, 2016: 2312-2318.
- [20] 周焯, 汪可友, 李国杰. 基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(11): 142-149.
(Zhou Y, Wang K Y, Li G J, et al. Distributed hierarchical control for microgrid based on multi-agent consensus algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(11): 142-149.)
- [21] Wei J, Kundur D, Zourntos T, et al. A flocking-based paradigm for hierarchical cyber-physical smart grid modeling and control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(6): 2687-2700.
- [22] Shi H, Wang L, Chu T G. Virtual leader approach to coordinated control of multiple mobile agents with asymmetric interactions[J]. *Physica: D Nonlinear Phenomena*, 2006, 213(1): 51-65.
- [23] Chapman J W, Ilic M D, King C A, et al. Stabilizing a multimachine power system via decentralized feedback linearizing excitation control[J]. *IEEE Transactions Power Systems*, 1993, 8(3): 830-839.
- [24] Liu Y, Min H B, Wang S C, et al. Distributed consensus of a class of networked heterogeneous multi-agent systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(3): 1700-1716.
- [25] Moeini A, Kamwa I, Brunelle P, et al. Open data IEEE test systems implemented in SimPower systems for education and research in power grid dynamics and control[C]. The 50th International Universities Power Engineering Conference. Piscataway: IEEE, 2015: 1-6.

作者简介

陈世明(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂网络理论及应用、多智能体系统协调控制、PSO优化算法等研究, E-mail: c1977318@hotmail.com;

韩红泉(1993—), 男, 硕士生, 从事电力系统暂态稳定控制的研究, E-mail: 1103726352@qq.com.

(责任编辑: 齐 霖)