电力系统的多智能体控制结构研究

吴高洁[1]，韦文书[2]，彭　健[2]，李　彬[2]，杨水锋[3]，刘兴高[4]

（1. 国防大学联合作战学院，河北 石家庄 050084；2. 中国航天一院，北京 100176；3. 成都飞机设计研究所，四川 成都 610041；4. 浙江大学控制科学与工程学院，浙江 杭州 310013）

摘要：电力行业中现有的多智能体控制结构存在控制精细度差、电能损耗率高的问题，针对此类问题，一种多智能体最优控制结构的新型设计方法被提出。此方法可以应用于多种目标函数的优化，提高控制效率，降低能量损耗。目前，关于所提的新型多智能体控制方法在电力系统中应用的研究正在进行。

关键词：电力系统；多智能体控制；最优控制；聚类

Research on multi-agent control structure of power system

WU Gaojie[1], WEI Wenshu[2], PENG Jian[2], LI Bin[2], YANG Shuifeng[3], LIU Xinggao[4]

(1. Joint Operations College, National Defense University, Shijiazhuang 050084, China; 2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100176, China; 3. Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610041, China; 4. School of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310013, China)

Abstract: The existing multi-agent control structure in the power industry has the problems of insufficient control sinking and high power consumption rate. To solve these problems, a new design method of multi-agent optimal control structure is proposed. This method can be applied to the optimization of multiple objective functions, improve control efficiency and reduce energy consumption. At present, the research on the application of the proposed new multi-agent control method in power system is ongoing.

Key words: power systems; multi-agent control; optimal control; clustering

0　引言

电力系统是一个复杂的动态系统，其控制要求发展复杂的自动化。目前，电力系统的控制主要基于分层原理。多智能体控制的一些变体已成功用于解决电力工程中的一些问题，例如，在文献[1]中，提出了电网分散电压控制的算法，该算法在一些特定的例子上有效地解决了问题，但并没有对所提出的解决方案的最优性进行数学证明。

多智能体控制的优化通常局限于智能体之间信息传输的优化。事实上，通过控制多智能体系统来实现不完全局部相对信息的智能协作是一个具有挑战性的问题。多智能体控制系统中侧重于在一些故障过程的情况下实现整体系统可靠性。文献[2]采用李雅普诺夫稳定性理论和反演方法，为具有未知扰动的多智能体系统开发了事件触发自适应跟踪控制。文献[3]研究了具有测量噪声的多智能体系统的一致性控制问题，实现了多智能体系统高效控制。文献[4]针对能源互联网信息安全框架下的调度弱集中和交易分散，提出了多级多链信息传输模型。

但是，一个重要且仍未解决的问题是开发一种合理的数字方法，用于在电力系统中创建多智能体控制的最佳结构。因此，本文提出了一种电

力系统多智能体控制最优结构的设计方法。

1 问题描述

多智能体控制系统是由多个相互作用的子系统组成的系统，满足以下条件：

1）每个智能体都有足够的自治权，也就是说，它会根据自己的算法工作，而不是集成到分层管理系统中。

2）所有的单独智能体都没有关于受控系统的完整信息。

在本文的框架内，多智能体控制问题是从最优控制的角度来考虑的，此时为整个系统制定一个共同的目标函数，使解决的控制问题最小化。如果认为系统的行为是确定性的，那么目标函数可以写成

$$\begin{cases}\min\limits_{u\in U}\int_{-T_p}^{T_f}\Phi(x(u,c,t))\mathrm{d}t\\ \text{subject to:}\\ b(u)\leqslant 0\\ g(x(u,c,t))=0\end{cases}\tag{1}$$

式中，T_p为对过去时刻考虑的深度；T_f为预测状态参数的时间范围；x为系统的状态向量；c为自由变量；u为集合U中控制操作；$b(\cdot)$为对控制参数的约束；$g(\cdot)$为与电网方程相对应的约束条件。

为了实现多智能体控制优化，只需考虑一个时刻即可。在这种情况下，目标函数的形式为

$$\begin{cases}\min\limits_{u\in U} f(x(u,c))\\ \text{subject to:}\\ b(u)\leqslant 0\\ g(x(u,c))=0\end{cases}\tag{2}$$

当以优化损耗和维持电力系统所需电压水平为准则来解决最优控制问题时，有目标函数

$$\begin{cases}f(Y_t)=\sum\limits_{i=1}^{n-1}\sum\limits_{j=i+1}^{n}(v_i-v_j)^2y_{ij}\\ \text{subject to:}\\ \mathrm{diag}(V)\cdot Y_t\cdot V^{\mathrm{T}}=S_t\\ y_{ij}\in[y_{ij\,\min},y_{ij\,\max}]\end{cases}\tag{3}$$

式中，v为电网节点中电压向量V的元素。

多智能体控制系统的结构用有向图表示。有向图的节点是电网的变电站，边缘是假定与输电线路一致的通信信道，如图1所示。智能体的控制可以放在该图的节点中，附加通信信道的问题应在特定应用中予以考虑。

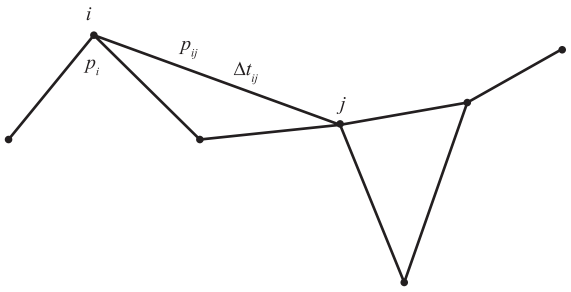


图1 多智能体控制系统的结构图

Fig. 1 Structure diagram of multi-agent control system

如果在一个点上获得有关电力系统运行的所有信息，那么电力系统的集中控制提供最佳解决方案。因为在这种情况下，使用最完整的模型。然而，在现实中，有一些因素可能导致需要多智能体控制，即：①信息传输延迟Δt_{ij}；②在节点P_i中实现控制系统的非零成本；③信息传输的成本ΔP_{ij}。

这里的成本可以理解为组织通信渠道和安装设备的费用，以及运营成本。单位时间的具体资本支出通过将成本除以使用寿命得到。因此，为了构建电力系统多智能体控制的最优结构，利用整个系统的已知目标函数确定控制智能体的位置、每个智能体操作的电网部分以及智能体之间交互的最优算法。

2 多智能体控制协调方法

由于分布式计算和统计物理领域的工作，多智能体控制方法的发展成为可能。最广泛的是多智能体协作控制算法，其主要思想是每个智能体在控制动作空间$u\in R^m$中沿其相邻的加权平均状态方向移动

$$u_i(t)=\sum_{j=1}^{n}a_{ij}(t)(x_j(t)-x_i(t))\tag{4}$$

式中，a_{ij}为智能体i和j之间的邻接系数；t为优化过程的时间。

在考虑数据传输延迟的固定拓扑网格中，多智能体协作控制的应用取得了良好的结果。在文献[5]中，多智能体协作控制用于电网的二次电压控制。但是，其中的协作管理没有考虑到这样一个事实，即整个系统最优控制的总体目标函数不是其组成子系统目标函数的加权平均函数。为了解决智能体的协调控制问题，提出了多智能体的编队控制方法。信息管理在于转换智能体获得的解决方案，使其满足整个系统的目标，即

$$u_i(t)=\sum_{j=1}^{n}a_{ij}(t)\varphi(x_j(t)-x_i(t),t) \tag{5}$$

式中，函数φ为在系统移动总趋势方向上的矩阵位移。

以上列出的多智能体管理方法通常假定智能体在系统中的位置是固定的，而控制系统的优化也仅限于建立单个智能体对信息传输路径总体决策和优化的影响。

3 创建多智能体控制系统的解决方案

在求解所考虑的整个系统共同的最优控制问题时，假设多智能体控制系统中的智能体使用与全局目标函数相似的同一目标函数。在这种情况下，单个智能体的目标函数值在系统的全局最优点可能不是最优的。

为了构建多智能体管理的最佳结构，有必要在独立智能体的控制下，将系统划分为不同的簇，即

$$\min_{m,N_c}\sum_{i\in N_c}p_{im}+p_m+I(N_c) \tag{6}$$

式中，m为簇的中心点；N_c为一组簇的顶点；P_{im}为从顶点i到m传递信息的成本，P_m为在顶点m对应的节点中组织计算的成本；I为与全局优化问题的解接近的指标。

由于平均水平配置的现代工业计算机可处理足够大的电网模型，因此可以忽略计算成本对智能体所用模型体积的依赖性。

最小化函数的组成部分$I(N_c)$描述了相应簇的智能体如何充分地解决总的最优控制问题，将其称为智能体的“意识指标”。该指标应考虑以下因素：①系统在簇级水平的可观测性；②信息传输的迟滞；③簇内优化问题的解与整个系统目标函数的贴近度。

指标I的值越高，智能体的意识越差。该指标可表示为

$$I(N_c)=I_c=\mathrm{cond}(H_c^{\mathrm{T}}R_c^{-1}H_c)^{-1}+J_c \tag{7}$$

式中，第一项决定了簇c的电网模型的可观测性。

$$H_c=\frac{\partial z_c}{\partial x_c} \tag{8}$$

式中，z_c为簇中可以获得的测量值；x_c为簇中电网模型的状态向量。

$$R_c=\mathrm{diag}\{r_{c_1},r_{c_2},\cdots,r_{c_{nc}}\} \tag{9}$$

式中，R_c为测量误差的方差对角矩阵。

考虑到通信信道传输信息的延迟，通过额外增加测量方差间接实现，计算公式为

$$r_{c_i}=\sigma_i^2+\mathrm{mean}(z_i(t)-z_i(t+\tau))^2 \tag{10}$$

式中，mean为由于数据传输延迟τ导致的接收测量值与实际测量值偏移的均方差。

式（10）中的第二项描述了如何将单个智能体的优化与整个系统的优化相对应。为了确定J_c，在整个系统的一组可用控制参数U的空间中组建目标函数的平均梯度$\bar{\nabla}f(U)$的场，并重新定义目标函数为$f(Y_i(U,S))=f(U,S)$。J_c展示了只有一个簇的优化偏离平均梯度场的程度，计算公式为

$$J_c=\sum_{i\in N_c}\left|\frac{\partial f}{\partial u_i}-\bar{\nabla}f(u_i)\right| \tag{11}$$

在智能体拥有不同目标函数时，多智能体控制优化通过多准则优化来实现。在这种情况下，保留构建多智能体控制结构的主要方法，整个系统的优化问题有如下形式

$$\min_{u\in U}(f_1(x(u,c)),\cdots,f_n(x(u,c))) \tag{12}$$

平均梯度场$\bar{\nabla}f(U)$通过一系列优化从初始条件计算得出，其中自由参数为

$$S=S+\xi;\xi\sim N[0;\sigma_S^2] \tag{13}$$

式中，σ_S为参数的方差。

作为每次计算的结果，得到了梯度场趋向

的帕累托有效解的面积。当优化整个系统和单个智能体时，向最优值移动的路径可能不一致。因此，计算每个有效解的平均梯度场是合理的。距离最优边界越远，场的值越大，但具体值不如方向重要。因此，假设

$$\nabla f(u)=(u-u^{p})+\frac{\partial u^{p}}{\partial u} \tag{14}$$

式中，u^{p}是理想点u^{*}在帕累托前沿的投影。

4 聚类

当在表示电网的图上形成簇时，面临的事实是簇的数量事先不知道。聚类算法（如k均值算法）需要在开始计算之前指定聚类数。此外，不仅需要考虑图形顶点与簇中心的接近程度，还需要考虑连接簇顶点的边的权重。为了根据准则分离智能体，提出了一种基于凝聚聚类的图聚类算法。初始状态的设置方式是将图的每个顶点假定为一个平凡簇。在沿着图形移动的过程中，簇合并，前提是当簇合并时，总优化函数变小，即

$$\min_{\{m_c\},\{N_c\}} E=\sum_{N_c\in\{N_c\}}\left(\sum_{i\in N_c}p_{im}+p_m+I(N_c)\right) \tag{15}$$

该簇的特点是同一节点可以是多个簇的一部分。因此，除了组合簇外，在优化过程中，簇中还包含一个或多个边界顶点。在簇的形状发生变化期间，由于可观测性的损失或函数值的增加，优化函数出现局部极小值。为了消除优化过程陷入局部最优，提出了一种启发式优化方法，即模拟退火方法。

文献[6]中提出一种快速退火的自适应变体的模拟退火方法。而在模拟退火方法中，基于与金属结晶的物理过程类比，系统的能量E指定为最小化函数。优化过程中降低的温度表征了求解过程中的随机性度量，快速退火方法对每个要优化的参数都使用单独的温度值。因此，对于要解决的问题，每个簇需要使用适当的温度。

如果将与一个簇相邻的节点包含到簇中会降低式（15）给出的系统的总能量，则执行将其包含到簇中的操作。如果能量的增量$\Delta E>0$，那么将一个新的节点包含到簇中的概率为

$$p(\Delta E)=\mathrm{e}^{-\frac{\Delta E}{T_c}} \tag{16}$$

式中，T_c为簇c的温度。

当簇合并时，簇的温度变为$T_{cn}=T_{c1}+T_{c2}$。

5 应用

在文献[7]中，电力系统的智能电压和无功功率自动控制在马加丹电力系统中实现，如图2所示。现在，分级控制系统覆盖220 kV/110 kV电压网络，但电力系统包含一个相当复杂的35 kV配电网络。如果把电压和无功功率的自动控制扩展到35 kV网络，在减少网络损耗和改善用户电压质量方面取得显著效果。然而，由于需要传输大量信息，并且需要花费时间将其传输到中心以生成控制操作，集中控制变得无效。

在这种情况下，一个可能的解决方案是开发多智能体最优控制系统，目前这个方向的实际任务是构建多智能体控制的最优结构。一般来说，多智能体控制系统的结构由电网和用户的结构决定。但是，这种控制系统架构的形成可能不是最优的，甚至是不可能的。首先，由于配电网中存在环形链路，单用户电路的状态可能无法观察到。此外，如果考虑特定用户的目标功能，即维持技术电压水平、确保稳定性以及协同使用本地控制资源的可能性，那么多智能体控制体系结构的形成就更加困难。本文提出的多智能体控制结构优化方法可用于此类系统的多智能主体控制设计。

6 结束语

本文提出的构建电力系统多智能体最优控制结构的方法可以应用于各种优化目标函数，从而实现电网的最优控制，提高控制效率，降低能量损耗。目前，正在研究所提的多智能体控制方法在大型电力系统中的应用。

参考文献

[1] 王渝红，廖逸犇，宋雨妍，等．风电场内部分散式无功电压优化控制策略[J/OL]．高电压技术，

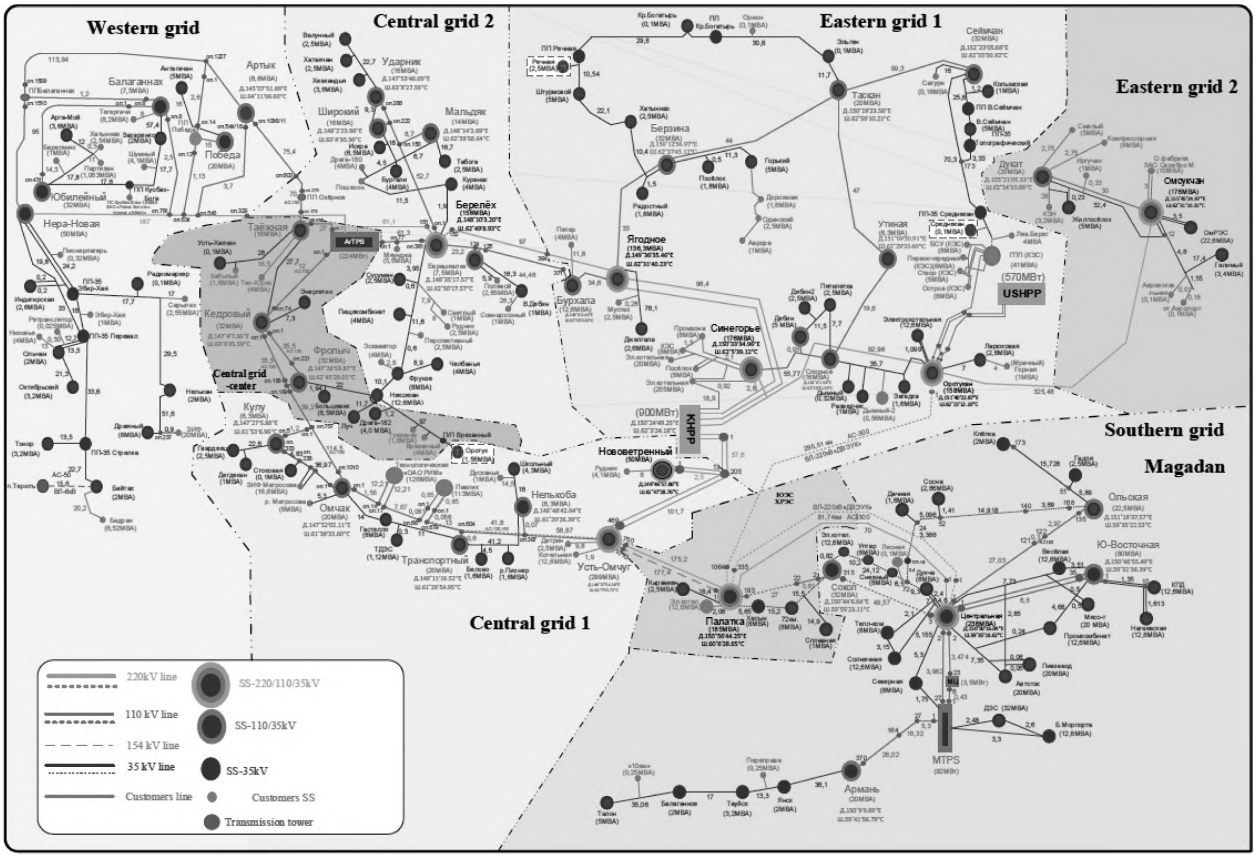


图 2　马加丹电力系统 [7]

Fig. 2 Magadan power system

2022(12)：5047-5056.

[2] 王涛，康宇，李鹏飞．基于自适应事件触发分布式模型预测控制的多智能体系统跟踪一致性[J/OL]．中国科学：技术科学，2022.

[3] 钟佳岐，陈晓雷，曾诚．具有执行器饱和的多智能体系统H_∞边界一致性控制[J/OL]．系统科学与数学，2023(1)：29-43.

[4] 殷爽睿，艾芊，曾顺奇，等．能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]．电网技术，2018，42(5)：1359-1369.

[5] 黄刚，翁良杰，朱涛，等．基于多智能体系统的分布式电压控制算法[J]．信息技术，2021(5)：153-159，165.

[6] 饶太春，兰林强，罗伟林．模拟退火法在协同优化中的应用[J]．福州大学学报，2018，46(3)：379-385.

[7] DOMYSHEY A V，OSAK，A B，PANASETSKY，D A．Methods and approaches for constructing a complex of automatic hierarchical control of reactive power sources in normal and post-emergency modes of the EPS[J]．Hierarchical Modeling of Energy Systems，2020：263-271.

作者简介

吴高洁（1966—），男，博士，教授，主要研究方向为电力系统控制。

（收稿日期：2022-10-26）