[智能电网]

基于事件触发机制的微电网无功功率控制

文/ 沈阳工业大学电气工程学院　魏诗萌　关　新　刘德华　李思敏　李博丰

智能电网是一种高度复杂的系统，是将传统电网进行改造，增加了新的、复杂的通信控制装置而形成的。微电网是智能电网的重要组成部分。针对多智能体微电网系统提出一种事件触发机制来决定相关信息何时被采样并传送给邻居。

智能电网是集分布式发电系统、智能基础设施、先进通信和管理技术于一体的新型电网。智能电网的主要特征包括自愈、激励和抵御攻击、提供满足用户需求的电能质量，减轻来自输电和配电系统中的电能质量事件，容许各种不同类型发电和储能系统的接入以及带动电力市场发展，汇集更多的卖家和买家以及优化资产应用，使运行更加高效。因此，近年来受到了广泛关注，取得了一些优秀的研究成果。

在智能电网的发展过程中，配电网需要从被动式的网络向主动式的网络转变，这种网络利于分布式发电的参与，可有效地连接发电侧和用户侧，使双方都能实时地参与电力系统的优化运行。因此，微电网作为智能电网的重要组成部分，是实现主动式配电网一种有效的方式。微电网也叫微网，是一种新型网络结构，也是一组由微电源、负荷、储能系统和控制装置构成的系统单元。微电网是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统，既可与外部电网并网运行，也可以孤立运行。微电网是相对传统大电网的一个概念，是指多个分布式电源及其相关负载按照一定的拓扑结构组成的网络，并通过静态开关关联至常规电网。开发和延伸微电网能够充分促进分布式电源与可再生能源的大规模接入，实现对负荷多种能源形式的高可靠供给，是实现主动式配电网的一种有效方式，是传统电网向智能电网的过渡。

在微电网中，如何做到经济运行，做到优化调度是一个重要的目标。传统的次级控制和经济调度都是集中式机构，这种结构导致通信量巨大，浪费资源的同时也降低了系统的安全可靠性。面对这些问题，本文引入多智能体系统和事件触发控制机制。多智能体系统具有自治性、社会性、通信性和反应性等优点，并且具有很好的学习和推理能力以及协作和协商能力。另外传统的控制方法一般是基于高频率的时间采样，这会消耗大量的资源并且使得系统的工作寿命降低。事件触发机制则不相同，事件触发机制可以决定每个发电机和每个负载之间的相关状态信息在什么时间被采样并传送给它的邻居，显著地减少了通信数据流，并且实现的控制性能几乎相同。

问题分析

1. 图论

通过引入有向图 $G=(V, \varepsilon, A)$ 来表示智能体间的信息交流，其中 $V=(1,\ldots,N)$表示节点的非空集合$\varepsilon=\{(j, i)$，$i, j\in V, j\neq i\}$表示有向边集合，$A=(a_{i,j})_{N\times N}$是邻接矩阵，当且仅当节点 j 的信息被节点 i 接收到时，$a_{i,j}>0$，否则 $a_{i,j}=0$。此外，总假设 $a_{i,j}=0$。节点 i 邻居的集合可以用 $\mathbb{N}_i=\{v_j|(v_j,v_i)\in\varepsilon，\ j\neq i\}$来表示。定义节点 i 的入度为

$d_i=\sum_{j=1}^{N}a_{i,j}$，入度矩阵为 $\boldsymbol{D}$=diag(d_1,…,d_N)。定义 $L=D-A$ 为有向图 G 的拉普拉斯矩阵。

2．系统模型

微电网是一种由分布式电源子系统、储能装置和负荷单元共同组成的特殊电力网络，可以在同一时间内供给不同的能量形式，如电能、热能等。微电网相对于大电网来说可以算是一个孤岛电网，在其中包含多个分布式电源和储能元件，它通过静态开关点和大电网连接，通过系统元件向大电网负荷供电。多智能体系统的微电网结构图如图 1 所示。

微电网的分布式系统呈现出不同的性能特征，其运算呈现出连续与离散的动态混合过程。该行为可被视为由外部环境和负荷需求等事件触发的离散动态行为，此时整体控制很难实现对于每个分布式电源系统运行模式间的智能控制，而多智能体系统可将微电网分块化处理，每个子系统对应一个智能体，每个智能体具有独立性和协调性，因此电网系统在独立运行的同时，还能保持控制信息的交换，保证系统稳定运行。微电网拓扑图如图 2 所示。

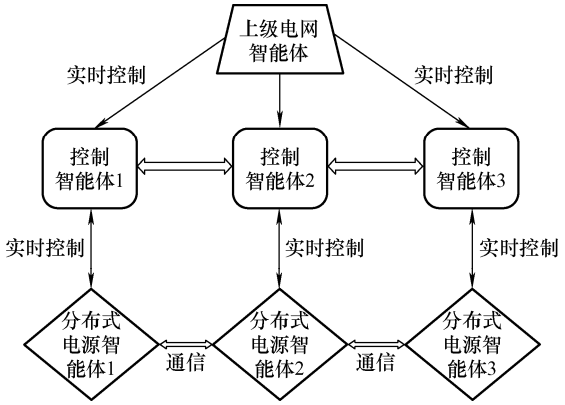

图 1　多智能体系统的微电网结构图

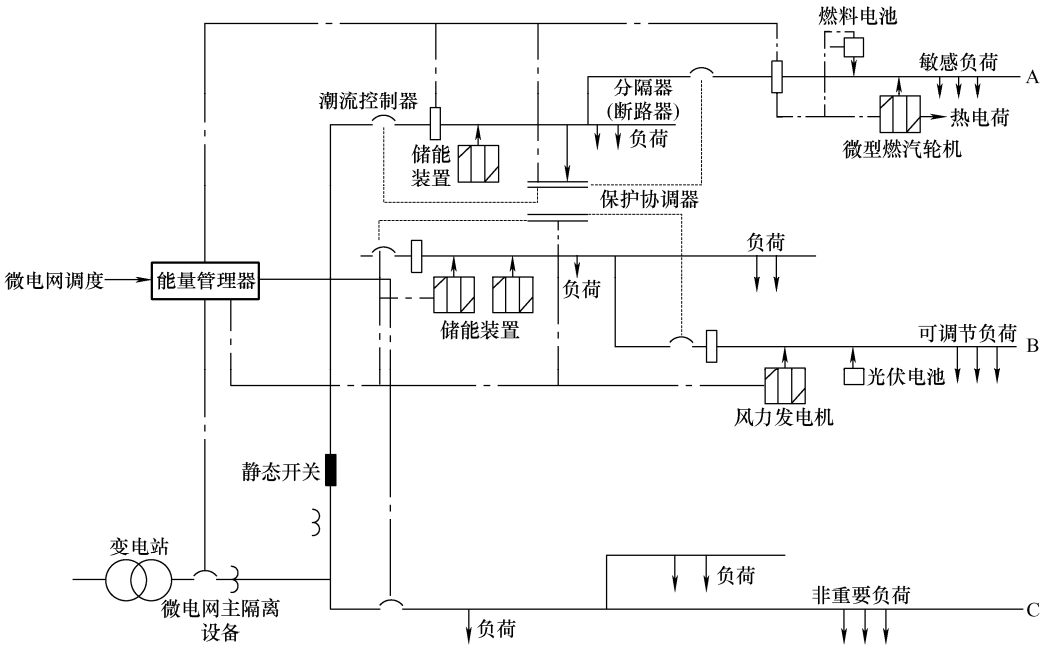

图 2　微电网拓扑图

3．事件触发机制设计

传统的微电网系统控制中，其控制策略一般采用时间触发机制，按照设定好的时间周期来触发控制任务，然而当微电网运行稳定时，系统仍然周期地触发控制任务就会造成资源浪费现象，并且增加状态监测系统的负载。因此本文基于这种情况，在微电网系统中设计如下的事件触发控制机制。

$$u_i(t)=-\frac{\kappa}{\chi_i}Vi(t)\sum_{i\in N_i^c}\left(\frac{Q_i(t^i_{k_i(t)})}{\chi_i}-\frac{Q_j(t^j_{k_j(t)})}{\chi_j}\right)$$

$$t\in\left[t_k^i,t_{k+1}^i\right)$$

式中，$k_i(t)=\arg\max_{k\in N}\left\{t_k^i\middle|t_k^i\leqslant t\right\}$ 表示最新事件触发瞬间到当前时间 t；$V_i(t)$ 是逆变器的电压幅值；$Q_i(t^i_{k_i(t)})$ 和 $Q_j(t^j_{k_j(t)})$ 表示逆变器的状态。这些状态可以通过邻居之间的通信来获得。因此事件触发控制器是分布式的，不需要中央

处理单元。事件触发结构图如图 3 所示。

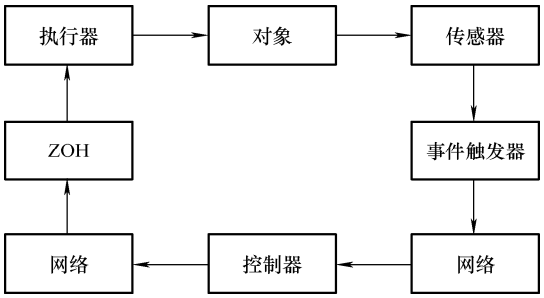

图 3　事件触发结构图

由于状态 $Q_i(t^i_{k_i(t)})$ 的测量是在事件触发瞬间 t^i_k 时 $Q_i(t)$ 的采样状态，因此，在控制器的设计中应该选择合适的事件触发时间，在这个触发时间，状态 $Q_i(t)$ 的采样测量不影响微电网的稳定性，因此设计事件触发条件设计成 $\hat{Q}_i(t)=Q_i(t^i_k),t\in\left[t^i_k,t^i_{k+1}\right)$，并且 $\hat{Q}_i(t)=\mathrm{col}\left(Q_i\left(t^i_k\right)\right)$。

算例分析与仿真结果

本文首先构建一个微电网系统，当传统的微电网系统稳定时，由于周期性的触发设置，依然会进行信息传递。因此本文构建了一个带有事件触发机制的控制器，这个控制器的设置可以通过事件触发条件来决定什么时候它的相关状态信息应该被采样并传送给它的邻居。

本文通过设计一个微电网仿真来验证所提方法的有效性，如图 4 所示。该系统由 6 个逆变器并联运行，并提供一个可变负载。带有事件触发机制下的控制器输入如图 5 所示，随着负载的增加，以及在事件触发机制的作用下，控制输入基本趋于一致，系统保持稳定。事件触发控制器下的时间间隔，如图 6 所示。体现出周期性和事件触发通信方案下微电网的通信传输，如图 7 所示。与标准的周期性采样和通信方案相比，本文所设计的控制器包含了事件触发机制，因此可以显著地减少通信数据流，达到了节约资源的目的，并且实现相同的控制动能。

表 1　无功功率额定值及其系数　　单位（pu）

编号	逆变器无功功率额定值	权重系数
1	0.53	3×0.53
2	0.72	3×0.72
3	0.33	3×0.33
4	0.67	3×0.67
5	0.44	3×0.44
6	0.22	3×0.22

表 2　其他部分参数

额定电压幅值/V	微电网频率/Hz
400	50

表 3　其他部分参数

控制器反馈增益/var^{-1}	逆变器期望电压幅值/ pu
2×10^{-5}	1

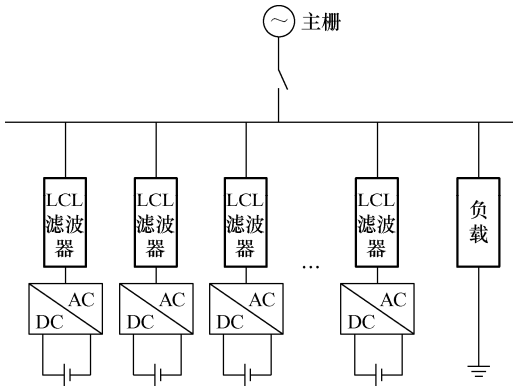

图 4　交流逆变器接口的并联直流微电网

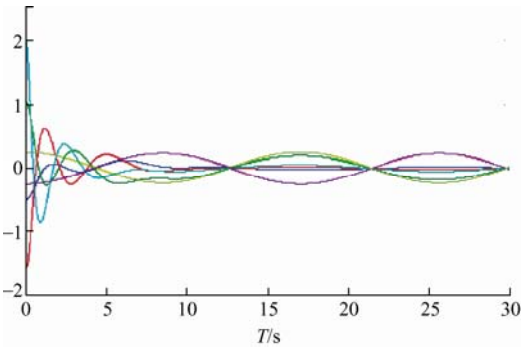

图 5　带有事件触发的控制器输入

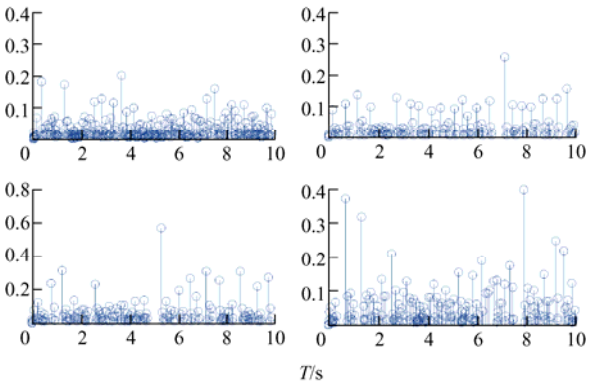

图 6　事件触发时间间隔图

（下转第 54 页）

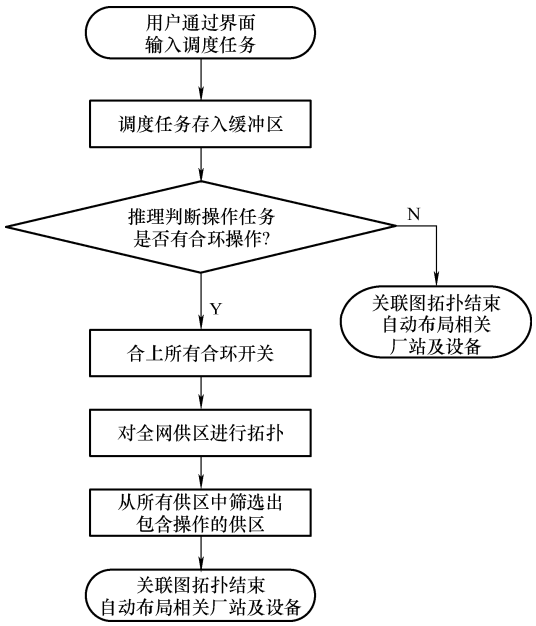

图 2　拓扑生成厂站关联图

在操作票的编制、预演、审核及推理和执行的过程中，根据电网实际的运行方式，生成电网结构图。目前，油田电网变电所数量多，变电所间连线纵横交错不易分辨，在绘制的厂站图基础上，当单击线路时，能自动搜索与该线路相连的电源，按照实际的连接方式，自动生成一张新的图形，也就是关联图。关联图中只调用与该线路连接的各侧变电所向外扩展到电源一次变为止，其余部分图形全部不调用。

5．操作票模拟预演分析

关联图生成之后，可以在关联图上进行调度指令票的预演，在预演时，每执行一步调度指令，该指令对应的操作均在图上进行显示，此过程又引入潮流分析计算，每操作一次进行一次潮流计算，同时该指令操作完成后引起电网的潮流变化也在图上进行显示，就可以连续动态模拟整个操作票的操作，通过预演充分了解指令票操作过程中的电网潮流变化。操作票可视化预演环境通过实时数据断面与电网模型图的融合，完成了各种运行方式下图形化操作票编制预演环境的生成。

达到的效果

电网智能操作票系统由于采用了先进的分层知识库结构，依据操作规则及电网网络拓扑关系进行综合判断，符合现电网调度运行的客观规律，自动生成 651 个操作序列，智能出票共实现《操作综合令》99 种、《综合令》23 种、《安措令》27 种、《系统令》9 种和《组织令》105 种操作票的编制。

自新智能操作票系统 2015 年 9 月运行至今，经历 5 个检修周期，共开出操作票 20 000 余张，正确率达到了 100%，大大缩短了工作时间，解决了调度人员的方案制定问题。

结束语

电网调度智能操作票系统解决了调度智能推理、关联图形、模拟预演和安全校核等技术问题，能够根据系统显示的电网潮流变化，正确进行合解环操作，实现了操作票的图形化智能出票，为电网调度指挥操作提供了有力的技术支持和决策依据，保障了油田电网安全和经济运行。EA

（收稿日期：2021.02.02）

（上接第 51 页）

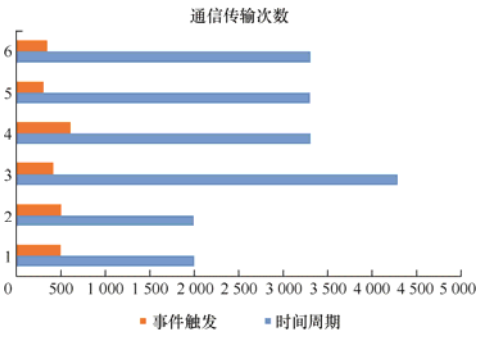

图 7　微电网的通信传输

结束语

本文通过构建一个微电网系统，基于事件触发机制，提出一个分布式电压控制器。结果表明，在事件触发机制下，每个逆变器在事件发生的瞬间进行传递，而不是周期性的信息传递，避免了无用的信息交流，显著地减少了微电网的通信量，降低了通信带宽的消耗，通过仿真实例可以看出，控制器在节约资源的同时也保证了系统的稳定性，并且在无功功率分配方面与传统的周期采样准确度几乎相同。EA

（收稿日期：2020.09.30）