

基于智能体协调的多微电系统 能量优化管理预测控制

针对由多个相互关联微电网组成的多微电网系统的协调控制与能量优化管理问题,提出基于智能体协调的分布式预测控制算法。采用基于智能体协调的DMPC (Distributed Model Predictive Control) 优化算法建立能量管理优化问题,协调多个微电网系统以最小的操作成本实时、准确地向用户负荷提供需求质量的电能。并在各微电网系统的MPC优化问题设计时,只考虑各微电网系统的局部模型和状态信息,减小优化问题的复杂度并降低通信需求,提高系统优化的实时性。仿真结果表明,采用此优化方法,不仅能保证短期内用户负荷需求的实时跟踪,同时达到长期内能量的优化调度和电网的经济运行。

李耀明 王正花 李惠庸/国网甘肃省电力公司经济技术研究院

0 引言

微电网因其能源利用率高、馈线损耗少和供电可靠性高等优点被推广,微电网技术已成为智能电网建设的重要部分。而多微电网系统的能量管理与优化运行对于提高微电网系统的安全、可靠及经济运行有着不可替代的作用。多微电网系统能量管理不仅要在满足电网约束条件下实现单个微电网内能量的优化管理,同时要协调能量在多微电网间的优化分配和流动,实现能量管理的全局优化,而目前针对多微电网能量管理的研究工作^[1]尚不多,因此具有重要的研究意义。

由于微电网系统承受扰动的能力比较弱,使电力系统运行的可靠性、安全性和稳定性均面临一定的危险,因此对多微电网系统间的协调控制与能量优化管理研究至关重要。文献[2-4]在满足电网约束的条件下,通过微电网能量管理

控制系统协调优化各分布式能源的功率输出,实时地向用户负荷提供电能。由于MPC具有易于处理约束和实时优化等特点,为微电网系统的优化设计提供了有效的途径。文献[5]全面地考虑了微电网中各个能量管理模块,采用集中式预测控制来优化微电网运行的经济性问题。针对由多个微电网组成的多微电网系统,文献[6]提出了基于预测控制的能量管理方法,从而实现每个微电网的供需平衡。文献[7]提出基于多智能体控制思想的能量管理策略,将每一个微电网看成一个智能体节点,节点与相应节点进行信息和能量的交换,优化节点的能量流动,实现多微电网间的能量优化分配。文献[8]采用预测控制算法,建立微电网内部能量流动的模型和预测控制优化问题,采用二次规划优化每个微电网的能量输出。文献[9]基于智能体协调的DMPC优化控制算法,在优化问题设计时,只考虑各个智能体的状态信息和状态模型,为微电网能量优化管理提供了可靠的控制策略。

考虑到多微电网系统是由多个相互关联的微电网组成的,提出了一种智能体协调DMPC^[10-11]的能量优化方法。基于多微电网间的能量流动,建立系统的能量管理模型。本文将微电网作为一个智能体,采用智能体协调DMPC优化算法,优化协调各个微电网子系统的输出功率参考值,并在MPC优化问题设计时仅考虑子系统的局部模型和状态信息,减小优化问题的复杂度并降低通信需



李耀明/工程师

关键词/Keywords

智能体协调·
分布式模型预测控制·
能量优化管理·
优化调度·

求。通过各个智能体的通信协调，达到多微电网系统的全局优化运行，实现新能源的有效利用且满足用户负荷的实时能量需求。

1 多微电网系统

以郊区微电网和校园微电网为例，基于协作的多微电网系统如图1所示。每个微电网内部通过一定的拓扑结构集合了分布式能源（风力发电、光伏发电等）、储能设备、用户负荷和中心控制站等组成。微电网间通过通信链路进行信息的交流，实现彼此间能量的流动。

本文考虑的多微电网系统由 N 个微电网组成。每个微电网内部的微电能源均包含以微型燃汽轮机为主的可控供电能源以及以风能和太阳能为代表的新型供电能源。同时考虑到可控能源供电成本相对较高，因此，多微电网间能量流动的主要是富余的新能源供电。

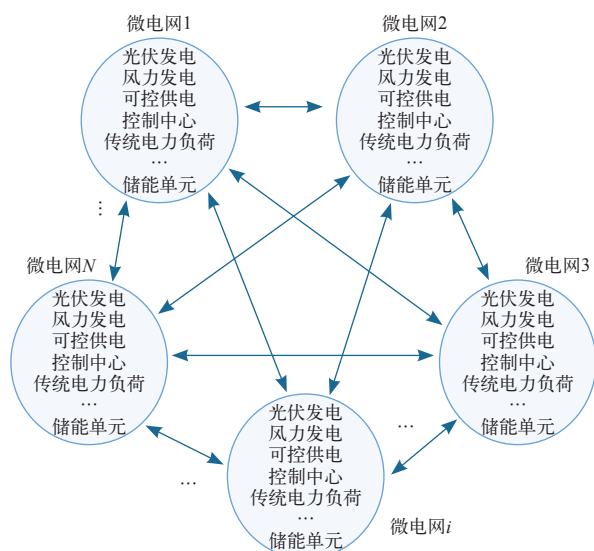


图1 多微电网系统结构图

在 k 时刻，假设微电网 $i(i=1\cdots N)$ 自身新能源供电难以满足自身用户负荷需求，即

$$E_i^{\text{renew}}(k) - E_i^{\text{ref}}(k) \leq 0, i=1\cdots N \quad (1)$$

式中， $E_i^{\text{renew}}(k)$ 为微电网 $i(i=1\cdots N)$ 在 k 时刻新能源的供电量； $E_i^{\text{ref}}(k)$ 为微电网 $i(i=1\cdots N)$ 在 k 时刻用户负荷的需求用电量。

一方面考虑从其他具有富余新能源供电的微电网进行购买电能，即

$$J_{11}(k) = \sum_j a_{ij} \min[E_j^{\text{renew}}(k) - E_j^{\text{ref}}(k)] \quad j \neq i, j=1\cdots N \quad (2)$$

式中， a_{ij} 为微电网 $i(i=1\cdots N)$ 在 k 时刻与微电网 $j(j \neq i)$ 的能量流动比例，它与微电网间的距离、供求平衡信息等因素有关； $E_j^{\text{renew}}(k)$ 为微电网 $j(j \neq i, j=1\cdots N)$ 在 k 时刻新能源的供电量； $E_j^{\text{ref}}(k)$ 为微电网 $j(j \neq i, j=1\cdots N)$ 在 k 时刻用户负荷的需求用电量。

另一方面通过调节自身可控供电输出 $u_i(k)$ ，补偿电网中缺少的电能，实现负荷需求的实时跟踪。

$$J_{12}(k) = \min_{u_i(k)} \|E_j^{\text{renew}}(k) - E_j^{\text{ref}}(k)\| \quad i=1\cdots N \quad (3)$$

式中， $u_i(k)$ 为微电网 $i(i=1\cdots N)$ 在 k 时刻可控供电输出。则微电网 i 总的优化问题为 $J_i(k) = J_{11}(k) + J_{12}(k)$ 。

多微电网系统能量管理的目标不仅要实现每个微电网的供求平衡，而且要减少可控供电的使用，降低供电成本，从而达到多微电网系统节能、经济地运行。因此，微电网系统 i 的MPC _{i} 的优化问题可用式(4)~式(8)表示。

$$\min_{u_i(k)} J_i(x_i(k), u_i(k)) \quad (4)$$

约束条件

$$x_i(k) = E_i^{\text{renew}}(k) - E_i^{\text{ref}}(k) \leq 0 \quad (5)$$

$$u_j(p|k) = u_j^*(p|k) \quad (6)$$

$$\tilde{x}_i(k+1) = \tilde{x}_i(k) + u_i(k) \quad (7)$$

$$\tilde{x}_i(k) = x_i(k) \quad i=1\cdots N \quad (8)$$

式中， $p=0, 1, \cdots, N-1$ ； u_j 为微电网系统 j 的可控供电输出值； $\tilde{x}_i(k)$ 、 $u_i(k)$ 分别为微电网 $i(i=1\cdots N)$ 在 k 时刻的预测状态轨迹和控制输入轨迹；式(5)为微电网 $i(i=1\cdots N)$ 在 k 时刻新能源不能满足用户负荷的约束条件。假定每个微电网子系统具有准稳态模型，采用智能体协调DMPC作为微电网 $i(i=1\cdots N)$ 的优化算法，微电网 $i(i=1\cdots N)$ 的系统模型仅考虑子系统的动态模型。在采样 k 时刻，通过求解式(4)得到优化解为 u_i^* 。

2 智能体协调DMPC优化算法

智能体协调DMPC优化算法不需要知道系统的

全局模型，从而减少系统状态变量。当多微电网系统增加新微电网系统时，只需要更新与其有相互关系的子系统信息，而不需要更新整个系统的信息，因此其优化算法具有可扩展性以及减少通信负担等优点。

将智能体协调DMPC优化算法应用到多微电网系统中，其优化算法流程如下。

1) 在 k 时刻，每个MPC的输入轨迹初始值为

$$u_i(p|k) = \begin{cases} u_i(p|k-1) & p \in [k, k+N-1] \\ u_i(p-k_s|k-1) & p \in [k, k+N-1] \end{cases} \quad (9)$$

式中， k_s 为采样时间； N 为MPC的预测时域。在 k 时刻，各子MPC($i=1 \cdots N$)接受相应传感器测量的状态信息 $x_i(k)$ ，同时每个微电网子系统之间相互通信，更新天气情况和负荷功率需求的预测信息。

2) 根据初始状态信息和输入初始值并行计算MPC i 迭代 m 次的最优解 $u_i^m(p|k) = \underset{u_i(p|k)}{\operatorname{argmin}} J_i(k)$ 。

3) MPC i 询问其他MPC是否受到其优化的影响，如果其他所有MPC同意询问请求，算法继续；如果不同意询问请求，MPC等待一个随机时间再次尝试询问请求。

4) 根据新计算优化输入 $u_i^m(p|k)$ 与当前可接受优化输入 $u_i^*(p|k)$ 的性能指标，计算MPC i 的优化解对MPC j 影响的性能指标增量为

$$\Delta J_j^i = J_j[x_j(p|k), u_i^m(p|k)] - J_j[x_j(p|k), u_i^*(p|k)] \quad (10)$$

如果最优解不满足相应本地优化指标的约束条件，此非最优解不予选择，将 ΔJ_j^i 传送给MPC i 。

5) MPC i 接受其他MPC的本地优化指标增量，计算MPC i 对其他MPC的影响，即

$$\Delta J^i = \sum_j \Delta J_j^i \quad (11)$$

如果 ΔJ^i 是负值，则 $u_i^*(p|k) = u_i^m(p|k)$ ，MPC i 发送 $u_i^*(p|k)$ 给其他MPC；否则舍弃其最优控制。

6) 超过输入最大值或采样时间结束，返回到步骤2)；否则计算 k 时刻的即时控制为

$$u_i(p|k) = [1 \cdots 0] u_i^m(p|k) \quad (12)$$

MPC将计算结果传递给每个微电网子系统，更新天气情况和负荷功率需求的预测值，返回到步骤1)中，重复以上过程。

3 仿真实验与结果分析

本文考虑由三个微电网共同构成的多微电网系统，每个微电网内部包括以风能和太阳能为代表的新能源供电、微型燃气轮机为代表的可控供电以及可预测的用电负荷。这里根据Hooshmand文中采集一天24 h内三个微电网数据，如图2所示。借助Matlab仿真平台，采用智能体协调DMPC优化算法进行多微电网能量管理的仿真实验，算法采用四阶Runge-Kutta，每个MPC的预测时域 $N=24$ ，采样时间 $k_s=5$ min。

在图2中，分别给出了微电网1、微电网2和微电网3的内部负荷功率需求、新能源的供电量及由

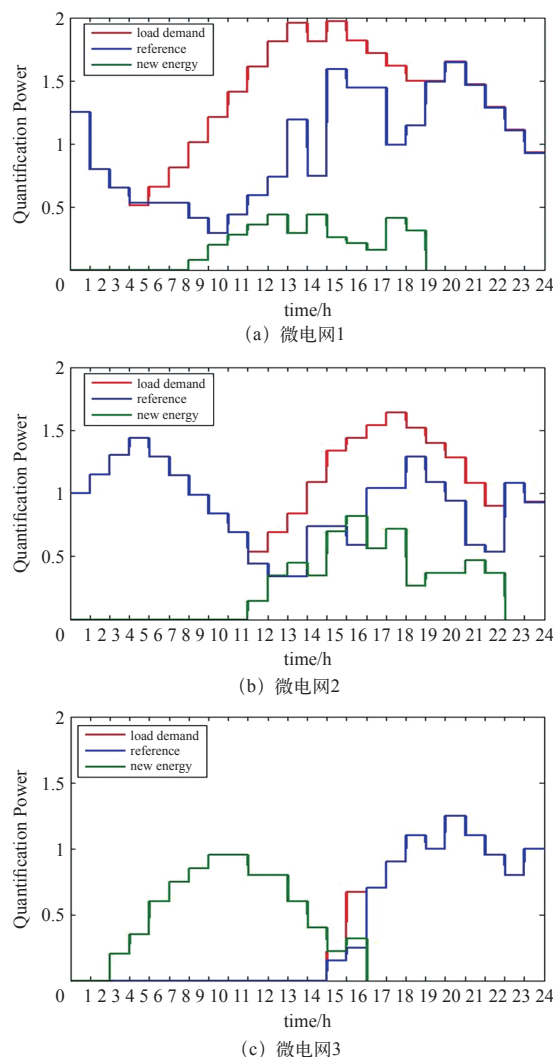
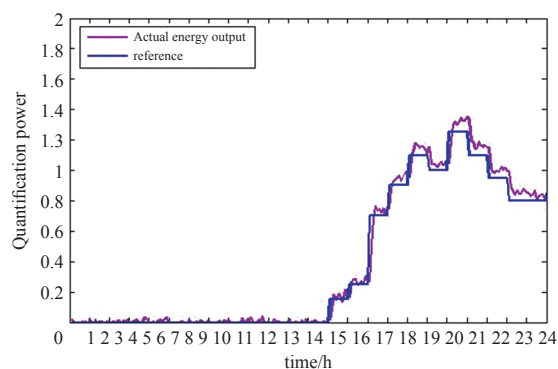


图2 24 h内各微电网的负荷功率需求、新能源供电以及用户需求设定

新能源的供电量与负荷功率需求量间的差值形成的设定值。从关于微电网的能量信息可以看出,微电网3在时间段0:00~13:00内具有富余的新能源供电,而微电网1和微电网2在此时间段内新能源的供电量难以满足自身负荷的需求。于是,基于多微电网间的协作策略,微电网3可将富余的电能售卖给能量供应短缺的微电网1和微电网2;反之,当微电网1或微电网2在某段时间内能量缺省时,可通过其他具有富余新能源供电的微电网请求获得富余的能量,从而提高能量利用效率,获取更多的经济效益。

图3中分别给出了一天24 h内微电网1、微电网2和微电网3负荷需求设定曲线和实时电力供应曲线,每个微电网内部的实时电力输出紧紧跟着用户负荷需求的设定值,实现了对负荷需求的实时满足。微电网3在时间段0:00~13:00内具有的富余新能源供电得到了有效利用。在其他时刻,微电网1、微电网2和微电网3中缺省的能量得到了实时补充。这说明,所提出的智能体协调

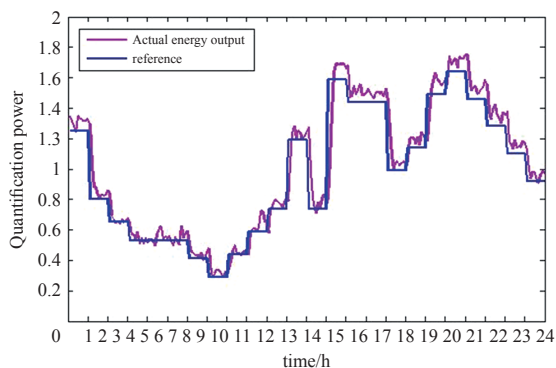


(c) 微电网3

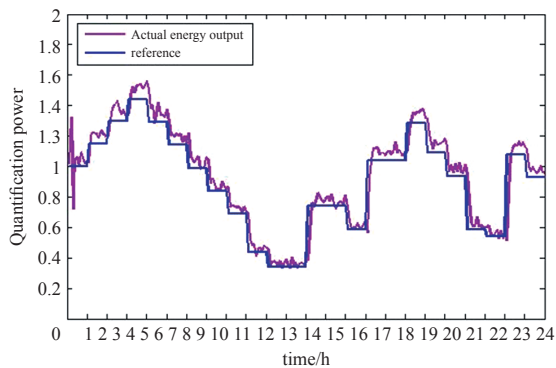
图3 24 h内各微电网中负荷需求设定曲线及实际总电能供应曲线

DMPC优化算法不仅实现了对新能源的高效利用,而且保证了对负荷需求的实时供应。除此这外,智能体协调DMPC对优化问题进行分布式优化求解,改善了集中式预测控制在针对复杂的大规模系统控制时所面临的复杂计算问题。

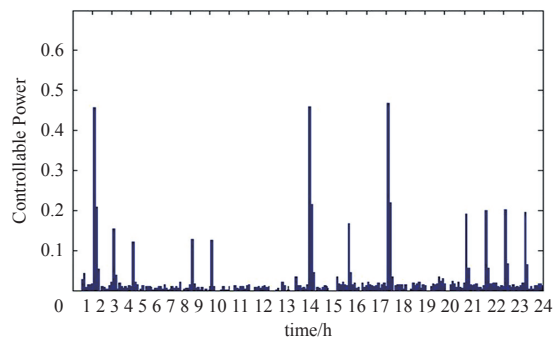
图4分别给出了一天24 h内三个微电网中可控能源供电功率的变化曲线。在图4的仿真结果中,当微电网1、微电网2和微电网3各自内部供求误差较大时,可控能源的供电功率将随之增大,实现对负荷需求的实时供应;当微电网内部的供求误差逐渐减小时,可控能源的供电功率也会随之降低,实现对能源的优化利用。微电网3在0:00~13:00时间段内由于新能源的供电量足以满足负荷的需求,一方面,自身可控能源的供电功率将会保持很小的值(这里设置为零);另一方面,将富余的能量转移给其他微电网,不仅提高了富余新能源的利用效率,而且减小了可控能源的供电功率,从而降低了微电网的供电成本。



(a) 微电网1



(b) 微电网2



(a) 微电网1

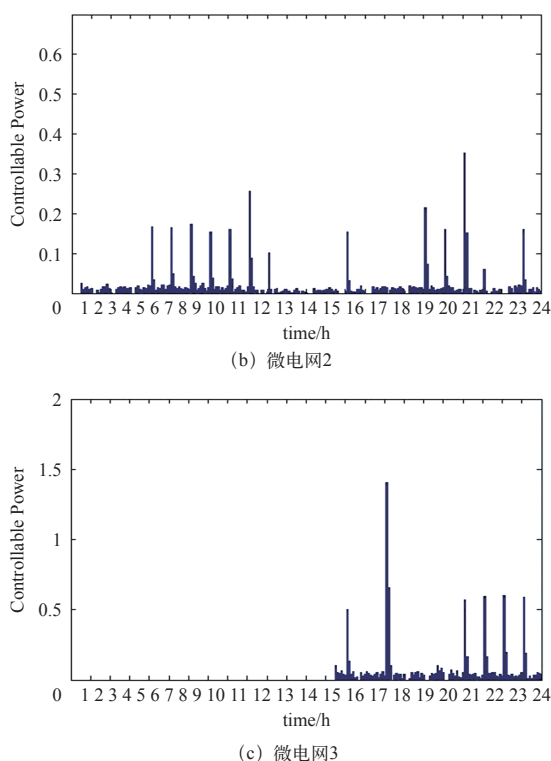


图4 24 h内各微电网中可控能源的供电曲线

4 结束语

针对多微电网系统的能量优化管理问题,提出了一种基于智能体协调分布式预测控制策略。基于微电网间的能量流动特性,建立系统的能量管理模型,通过求解基于系统供求平衡误差的分布式预测控制优化问题,实现对新能源的有效利用和负荷需求的实时满足,在保证系统实时性需求的前提下减少了优化问题求解的计算量。通过微电网的运行调度和能量优化管理的优化策略,确保了微电网系统运行的安全性及稳定性,提高了系统的可靠性和经济性。

参考文献

- [1] Sortomme E, Sharkawi M A. Optimal power flow for a system of microgrids with controllable loads and battery storage [C]. IEEE Conference on 2009 Power Systems Conference and Exposition, Seattle, 2009: 1-5.
- [2] Asano H, Hatziargyriou N, Iravani R, et al. Microgrids [J]. IEEE Transactions on Power and

Energy, 2007, 5 (4): 78-94.

- [3] Chen J, Yang B, Guan X. Optimal demand response scheduling with stackelberg game approach under load uncertainty for smartGrid [C]. IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications, USA: IEEE, 2012: 546-551.
- [4] Edward J, El-Shatshat A, Ramadan N. Multi-microgrid control systems [C]. Proceedings of the 49th IEEE Conference on Power and Energy Society, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [5] Le X, Ilic M D. Model predictive economic/environmental dispatch of power systems with intermittent resource [C]. Proceedings of 2009 IEEE Meeting on Power & Energy Society General. USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [6] Parisio A, Glielmo L. Energy efficient microgrid management using model predictive control [C]. The 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, USA: IEEE, 2011: 5449-5454.
- [7] Mohamed F A, Hatziargyriou N D. Operation of a multi-agent system for microgrid control [J]. IEEE Transaction on Power System, 2005, 20 (3): 1447-1254.
- [8] Hooshmanda A, Malkib H A, Mohammadpourc J. Power flow management of microgrid networks using model predictive control [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 64 (5): 869-876.
- [9] Maestre J M, Muñoz de la Peña D, Camacho E F, et al. Distributed model predictive control based on agent negotiation [J]. J Process Control, 2011, 21 (5): 684-697.
- [10] 郭红霞, 吴捷, 康龙云, 等. 基于多智能体的分布式发电系统协调优化 [J]. 控制理论与应用, 2012, 2 (29): 235-239.
- [11] 魏善碧. 多智能体系统分布式预测控制方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

(收稿日期: 2018-02-10) **EA**