

集群空调负荷提供微电网调频备用研究

李娜¹, 王晓亮²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250001; 2. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250001)

摘要: 微电网中空调负荷所占比例逐年增长, 集群空调负荷提供备用容量潜力巨大。为准确描述集群空调负荷功率需求特性, 根据空调负荷工作过程热交换平衡原理建立基于一阶物理模型的集群负荷模型。考虑负荷响应特性, 提出集群负荷目标温度设定值与系统频率线性响应关系的负荷调频模型, 通过调整集群负荷目标温度提供调频备用, 降低对用户舒适度影响。仿真结果表明, 集群负荷参与微电网调频具有可行性和实用性, 为负荷侧参与微电网运行控制提供基础。

关键词: 空调负荷; 集群负荷; 调频; 备用容量; 负荷控制

Research of air conditioners providing frequency controlled reserve for microgrid

LI Na¹, WANG Xiaoliang²

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250001, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250001, China)

Abstract: With their proportion increasing gradually, air conditioners can be a feasible option to provide certain amount of reserve for microgrid. A clustered model based on first-order physical model is provided according to the heat exchange balance. The model can depict appropriately the working characteristics of air conditioners. Considering load response characteristics, a frequency adjustment model is provided, which conditioners' setting temperatures are inversely proportional to grid frequency. This frequency adjustment model reduces the influence to users' comfort. Simulation results verify the effectiveness and usefulness for clusters air conditioners, providing reserve for microgrid.

Key words: air conditioners; clustered loads; frequency adjustment; reserve; load controlling

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)19-0101-05

0 引言

为维持安全稳定运行, 传统电网是由区域内发电机组以及区域间的联络线向电力系统提供备用容量的^[1]。随着发电构成的变化, 特别是对于间歇能源所占比例较高的微电网, 消纳间歇性能源发电对备用的总量与品质提出了更高的要求^[2-3], 传统备用形式亟待改进, 挖掘负荷侧提供备用的潜力日趋重要。空调、冰箱与热水器等功率需求与热交换相关的可控负荷, 具有短暂的能量存储特性, 短时投切或调整目标温度值不会明显改变其效用, 但可及时减少功率需求, 等效于为电网提供备用容量^[4-10]。近几年我国空调负荷增长迅速, 夏季空调负荷占电网最大负荷的20%左右^[11], 因此, 由空调负荷为微电网提供备用容量潜力巨大。

文献[12]提出两种应用恒温可控负荷作为备用

的控制逻辑, 可以通过响应频率变化改变其温度设定值以提供系统备用, 但仅有理论分析, 并无验证其可行性。文献[13]提出分散存在的负荷可通过直接控制、分层控制、分布式控制等策略提供备用容量, 从电动汽车充放电提供备用角度进行深入研究, 但对热交换过程具有储能特性的可控负荷并未涉及。文献[14]研究了动态负荷控制响应频率变化的可行性, 并建立了一个电网的简化模型, 同时考虑了具有动态需求控制作用的冰箱负荷, 仿真验证负荷参与可减缓系统频率下降速度以及对快速启动的备用机组的依赖性。文献[15]提出应用直接负荷控制平抑因风电随机性引起的电网功率波动, 并仿真验证了负荷控制的有效性。文献[14-15]研究内容均为直接控制储能负荷启停状态提供备用, 等效于切负荷, 对用户影响较大。

本文根据空调负荷工作过程中的热交换平衡原

理建立空调制冷状态的负荷一阶模型，并应用蒙特卡洛模拟法建立可描述集群负荷功率需求特性的负荷模型；提出空调负荷集中控制策略，建立了通过调整目标温度提供备用的集群负荷线性响应电网频率变化的调频模型，对用户舒适度影响较小。仿真结果验证了集群空调负荷为微电网提供调频备用的可行性。

1 可控负荷建模

1.1 基于一阶状态方程的空调负荷模型

图1所示为空调负荷工作过程热交换示意图，即将电功率转换为热功率，实现室内与室外热量交换并使室内温度维持其设定温度，此过程始终遵循能量平衡原理，假设功率转换、热量交换过程能量损耗忽略不计，则所有电功率全部转换为热量。

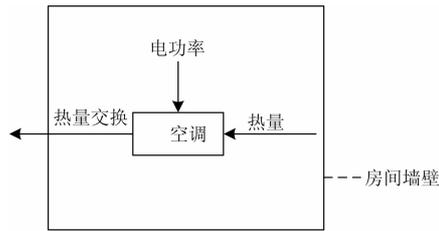


图1 空调热量交换过程

Fig. 1 Heat exchange process for air conditioner

根据空调工作过程的热交换原理，可建立基于状态方程描述空调负荷工作过程的数学模型，如式(1)、式(2)所示。

$$\frac{dx_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{CR} (x_{ew}(t) - x_{in}(t)) - \frac{1}{C} m(t) \cdot P \quad (1)$$

$$m(t_{n+1}) = \begin{cases} 0, & x < x_- \\ 1, & x > x_+ \\ m(t_n), & x_- \leq x \leq x_+ \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x_{in}(t)$ 为 t 时刻室内温度值， $^{\circ}\text{C}$ ； C 为室内墙壁等效热容值； R 为室内墙壁等效热阻值； $x_{ew}(t)$ 为 t 时刻室外的环境温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $m(t)$ 为 t 时刻空调负荷的工作状态，0或1； P 为空调负荷的额定功率值， kW ； x_- 、 x_+ 表示空调关闭和开启的边界温度设定值， $^{\circ}\text{C}$ 。

求解式(1)、式(2)，可得到空调负荷制冷状态时随时间变化的功率需求特性及室内温度变化特性如图2所示。

1.2 集群负荷模型

在单台空调负荷模型基础上，为建立集群空调负荷功率需求模型，根据其关键参数的分布特性，当负荷数量足够多时，蒙特卡洛模拟是一种较精确的方法。根据中心极限定律，蒙特卡洛模拟的精确

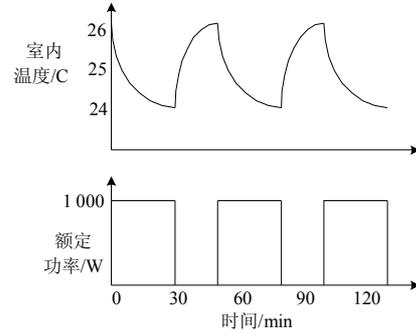


图2 空调负荷工作过程的功率需求特性及室内温度变化特性

Fig. 2 Power demand and indoor temperature changes during air conditioner working

度依赖于参与聚合的空调台数 N ，误差随着 N 的增大而减小，若 N 足够大，误差近似为零。

为求解空调负荷功率需求及室内温度的变化轨迹，首先对式(1)中的各参数根据其概率分布进行抽样，将其离散化，得到式(3)。

$$x_{in}(t_{n+1}) = x_{in}(t_n) + \Delta t \left[\frac{1}{CR} (x_{ew}(t_n) - x_{in}(t_n)) - \frac{1}{C} m(t_n) \cdot P \right] \quad (3)$$

联立式(2)、式(3)，采用欧拉法迭代求解状态空间方程，得到空调负荷工作状态及对应室内温度变化的轨迹。

假设空调负荷数量为 N ，各空调在 t 时刻的运行状态可表示为 $m_i(t)$ ，每台空调额定功率为 P_i ，根据大数定律，集群负荷任意时刻 t 的平均运行状态及功率需求可表示为

$$m_a(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t) \quad (4)$$

$$P(t) = \sum_{i=1}^N P_i m_i(t) \quad (5)$$

2 提供调频备用响应机制

2.1 传统系统频率响应模型

忽略发电机组之间的振荡，传统电网各处的频率近似相等，即为系统的统一频率。假设独立的微电网可以采用1台等值发电机组来表示系统频率响应。取汽轮发电机组作为等值发电机组，典型发电机组的调速模型可如图3所示，将发电机组简化为一个惯性环节后，全网的等值频率响应模型可如图4所示。

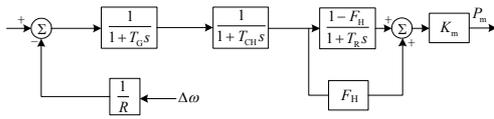


图3 典型汽轮发电机组的调速模型

Fig. 3 Governor model of typical turbine generator

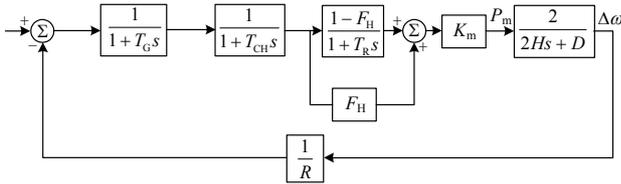


图4 系统等值频率响应模型

Fig. 4 Equivalent frequency response model

图3、图4中各参数如下所示:

T_G 为调速器测量环节时间常数; T_{CH} 为蒸汽室时间常数; T_R 为再热时间常数; H 为惯性常数; F_H 为高压汽缸功率比例; K_m 为机械功率增益; R 为调差系数; D 为阻尼系数。

微网频率响应模型参数具体取值如表1所示。

表1 微网频率响应模型参数

Table 1 Parameters of frequency response model

参数名	取值
T_G	0.3 s
T_{CH}	0.332 s
T_R	7.5 s
H	3.8 s
F_H	0.25
K_m	0.94
R	0.05
D	1

2.2 集群负荷的频率响应模型

夏季空调负荷功率需求较大, 占电网负荷比重较高, 而短时投切或调整其目标温度值对用户舒适度影响较小, 已有理论验证集群空调负荷也可如发电侧一般响应频率变化, 参与电网调频。

为实现集群负荷提供备用容量, 大量研究均是直接控制负荷启停状态改变其功率需求^[16-19], 等效于切负荷, 对用户舒适度影响作用较大。由于空调工作的热交换为持续性过程, 短时调整目标温度可改变其功率需求但室内温度变化较小, 对用户舒适度及实用性影响较小, 故可通过改变集群负荷目标温度以调整其功率需求, 保证用户需求的同时为系统运行提供调频备用。

建立集中控制平台, 集中控制集群负荷目标温

度, 各空调负荷目标温度服从离散高斯分布, 彼此独立, 根据微网频率的变化各自响应, 在初始目标温度设定值基础上调整以改变集群负荷功率需求, 辅助发电侧维持系统频率稳定。如图5所示为各负荷的目标温度设定值与微电网频率变化关系, 当微网频率下降时, 集群负荷目标温度在其初始设定值线性升高, 频率升高时则目标温度值下降。目标温度随微网频率变化的量化关系如式(6)所示。

$$T_{\text{set-调整}} = -2f + 100 + T_{\text{set}} \quad (6)$$

式中: $T_{\text{set-调整}}$ 为响应系统频率调整后的负荷目标温度值, °C; f 为微网频率, Hz; T_{set} 为负荷初始目标温度值, °C。

集群负荷参与调频的微电网频率响应模型如图6所示。

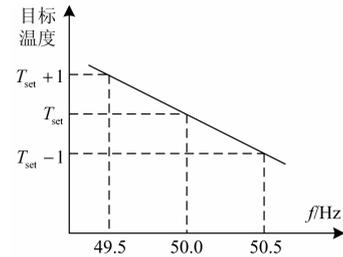


图5 集群负荷目标温度与系统频率变化关系

Fig. 5 Relationships for clustered loads and grid frequency

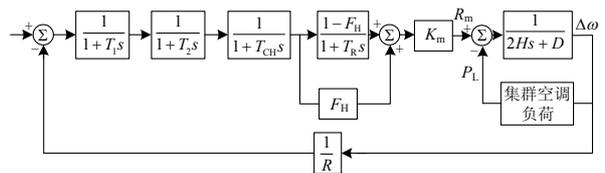


图6 集群空调负荷参与调频的微电网频率响应模型

Fig. 6 Frequency response model with clustered air conditioners participating

3 仿真分析

为验证集群空调负荷模型参与微电网调频提供调频备用的可行性, 对所建立集群负荷模型进行仿真, 求得集群负荷连续的功率需求特性, 并在Simulink环境下建立系统调频模型, 分别仿真对比了传统调频模式和集群负荷参与后的微网频率变化, 验证了集群负荷提供调频备用的可行性。

3.1 集群负荷功率需求特性

取典型夏季中午时段 10:00~15:00, 十万台空调负荷总额定功率为 100 MW, 其关键参数分布特性如表2所示, 外界环境温度变化如图7所示。对1.2节建立的集群负荷模型进行仿真, 集群负荷目标温度设定值离散高斯分布下, 初始设定场景与目标温

度集中升高 1℃后，负荷功率需求特性仿真对比如图 8 所示。由图 7 和图 8 对比可知，随着外界环境温度的升高，集群负荷的功率需求也随之增加，即外界温度较高时，需消耗较多电功率转化为热量交换，维持室内温度在目标温度设定值。由图 8 两种场景下负荷功率需求对比可知，集群负荷目标温度设定值升高，为维持室内温度需与外界交换的热量减少，即功率需求降低，故调整集群负荷目标温度可改变其功率需求。

表 2 集群空调负荷关键参数分布

Table 2 Key parameter distribution of clustered air conditioners

参数名称	概率分布特性
目标温度设定值	离散高斯分布
房间热容、热阻	连续高斯分布
额定功率	连续高斯分布

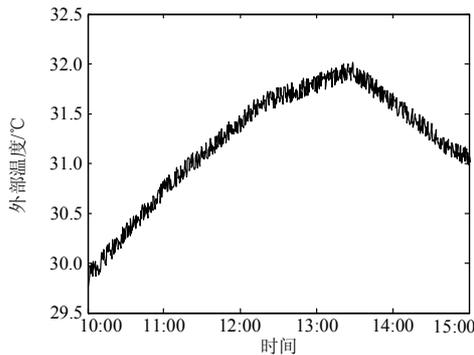


图 7 集群负荷外界环境温度变化

Fig. 7 Out-door temperature change property for clustered loads

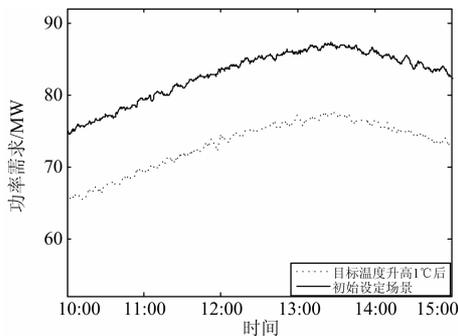


图 8 集群负荷功率需求变化

Fig. 8 Power demand property of clustered loads

3.2 可控负荷参与调频

当集群空调负荷数量较大时，其总容量可等效为发电机组。通过调整集群负荷的设定温度可改变总功率需求，参与系统调频，假设微网正常运行状态下突然失去 4%的发电功率，由于发电与负荷之间出现不平衡，系统频率将下降，系统发电机组调速系统动作、增加出力，再次建立发电与负荷之间的平衡，系统频率随之上升。集群空调负荷根据式

(6)的响应策略，在系统频率下降后集中调整其目标温度设定值使其升高，降低负荷功率需求，协助发电侧进行频率调整。

假设集群空调负荷占比 2%，则集群空调负荷不参与系统调频、参与系统调频的系统频率变化特性对比如图 9 和表 3 所示。由图 9 和表 3 分析可知，有负荷响应频率变化时，系统频率波动范围小，频率下降的最低值由 3.62 s 时的 49.68 Hz 上升到 3.31 s 时的 49.725 Hz，且频率恢复的稳定值由 49.936 Hz 上升到 49.971 Hz。仿真分析可知，集群空调负荷参与微电网调频，可等效于发电机组，使系统频率波动范围变小，恢复更快，集群空调负荷参与微电网调频提供调频备用具有可行性和实用性。

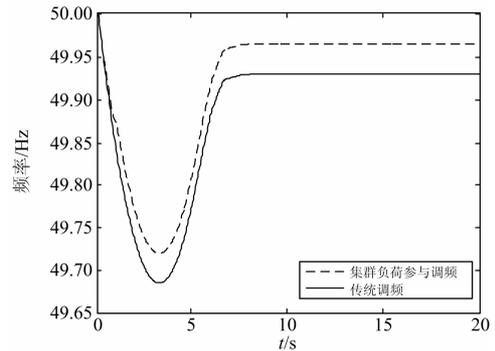


图 9 集群负荷参与调频与传统调频模式的频率响应特性对比

Fig. 9 Frequency response property contradistinction for traditional frequency control and loads participating control

表 3 两种场景仿真结果对比

Table 3 Simulation result contrast of two circumstances

场景	频率最低值/Hz	频率最低值时间/s	频率恢复稳定值/Hz
传统调频	49.68	3.62	49.936
集群负荷参与调频	49.725	3.31	49.97

4 结论

采用蒙特卡洛模拟方法，依据空调负荷工作过程的热交换平衡原理，建立了集群空调负荷功率需求模型。提出目标温度设定值与微电网频率线性响应关系的负荷调频模型，并仿真对比传统调频、负荷参与调频的微电网频率变化特性，验证了集群空调负荷提供备用容量的实用性和可行性，为负荷参与微电网运行提供备用容量提供了理论支撑。

参考文献

[1] WOOD A J, WOLLENBERG B F. Power generation operation and control[M]. Beijing: Tsinghua University

- Press, 2003.
- [2] ORTEGA-VAZQUEZ M A, KIRSCHEN D S. Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 114-124.
- [3] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 231-238.
- YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 231-238.
- [4] XU Z, ØSTERGAARD J, TOGEBY M. Demand as frequency controlled reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 26(3): 1062-1037.
- [5] 薛禹胜, 罗运虎, 李碧君, 等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 1-6.
- XUE Yusheng, LUO Yunhu, LI Bijun, et al. A review of interruptible load participating in system reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 1-6.
- [6] 李晓军, 谭忠富, 王绵斌, 等. 考虑用户参与下电网公司购买备用的优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 9-14.
- LI Xiaojun, TAN Zhongfu, WANG Mianbin, et al. Optimal model of buying reserve capacity of power grid considering consumer's participation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2007, 19(2): 9-14.
- [7] ZHAO Qingqi, LI Ming, ZHANG Huaguang. Spinning reserve from responsive load via intelligent energy management network[C] // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Florida, USA: 2006.
- [8] 阳小丹, 李扬. 家庭用电响应模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 51-56.
- YANG Xiaodan, LI Yang. Research on household electricity response mode[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 51-56.
- [9] 赵慧颖, 刘广一, 贾宏杰, 等. 基于精细化模型的需求侧响应策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 62-68.
- ZHAO Huiying, LIU Guangyi, JIA Hongjie, et al. Analysis of demand response program based on refined models[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 62-68.
- [10] 褚晓东, 李娜, 张文. 气象分区在负荷备用容量评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 19-24.
- CHU Xiaodong, LI Na, ZHANG Wen. Application of meteorological partition to assessment of reserve capacity from responsive load[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 19-24.
- [11] 宋宏坤, 唐国庆, 卢毅, 等. 江苏省夏季空调负荷分析及需求侧管理措施的削峰效果测算[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 88-91.
- SONG Hongkun, TANG Guoqing, LU Yi, et al. Summer air conditioners load analysis of Jiangsu province and the estimation of load shifting in demand-side management[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 88-91.
- [12] XU Z, ØSTERGAARD J, TOGEBY M, et al. Design and modelling of thermostatically controlled loads as frequency controlled reserve[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007: 1-6.
- [13] CALLAWAY D S, HISKENS I A. Achieving controllability of electrical loads[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 184-199.
- [14] SHORT J A, INFELD D G, FRERIS L L. Stabilization of grid frequency through dynamic demand control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1284-1293.
- [15] CALLAWAY D S. Trapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1389-1400.
- [16] YUAN Y H, CHUNG C S. Dispatch of direct load control using dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 1056-1061.
- [17] SALEHFAR H, PATTON A D. A production costing methodology for evaluation of direct load control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 278-284.
- [18] DANIEL T, MATT D. Power-system frequency and stability control using decentralized intelligent loads[C] // IEEE Power Engineering Society T & D Conference and Expo, 2005: 1-6.
- [19] MOLINA-GARCIA A, BOUFFARD F, KIRSCHEN D S. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 411-419.

收稿日期: 2014-12-08; 修回日期: 2015-04-13

作者简介:

李娜(1987-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、可靠性分析; E-mail:linabetty@163.com

王晓亮(1987-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护等。

(编辑 葛艳娜)