

基于滑差同调等值的空调群负荷建模

郑竞宏, 朱守真

(清华大学电机系电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京市 100084)

摘要: 随着空调负荷比例的迅速增长, 对系统的暂态电压稳定逐渐带来威胁。为更好地描述含空调启动的空调群负荷特性, 文中将同调等值法扩展到空调群的负荷建模中, 提出了基于滑差同调等值的负荷建模方法和模型, 用阻尼最小二乘法对含空调启动特性的空调群综合负荷进行建模, 通过仿真验证了建模方法的有效性。

关键词: 滑差同调等值; 空调群负荷建模; 阻尼最小二乘法; 空调启动建模

中图分类号: TM714

0 引言

随着中国经济的迅速发展及气候变暖, 一些中心城市城网的空调类负荷数量有了迅速的增长, 且这种增长趋势还会加快^[1]。据统计, 2005 年北京夏季的空调负荷已经达到 42.7%, 比 2004 年增长了 23.3%^[2]。由于空调负荷特殊的无功-电压特性, 将给城市电网电压稳定性带来威胁。1987 年 7 月日本东京曾发生过一次令人震惊的电压崩溃事故, 空调类负荷在事故中起了很大的负面作用^[3]。近年来, 对空调负荷进行的研究结果表明: 空调负荷所占比例增大, 其特殊的启动特性和电压恢复特性将会对电网的电压稳定性产生越来越不利的影响^[4-6]。

空调的主要工作部件——压缩机属于电动机的一种, 具有与电动机相似的特性。但与普通的电动机群负荷不同, 空调群在运行过程中, 随着室内气温的变化, 会频繁地启动和停止, 而且因为其启停都依赖于温度, 在某些情况下易造成相当数量的空调同时启停。而空调的启动会产生 3 倍~6 倍于额定功率的有功和无功冲击, 如果同时启动的空调数量很多, 将使得输电线路电压降落增大, 从而造成负荷侧母线电压出现短时降低现象, 严重时甚至会引起系统暂态电压失稳。因此, 空调群的负荷建模不能忽视空调频繁启动这一重要运行特性。

文献[6-7]对空调的启动进行了研究, 采用 Karlsson-Hill 模型对空调的正常状态进行描述, 对空调启动过程采用指数函数进行近似描述。很多文献都指出暂态稳定分析的负荷模型宜采用“3 阶感应电动机模型+静态负荷模型”的形式^[8-11], 因此,

Karlsson-Hill 模型并不适合暂态稳定分析需求。

本文基于电力系统动态等值理论, 提出滑差同调等值概念对含启动过程的空调群暂态过程建模进行指导, 然后采用阻尼最小二乘法辨识该模型的参数, 最后通过算例验证了建模方法的正确性。

1 基于滑差同调等值的空调群负荷动态等值模型

1.1 滑差同调等值的概念

电力系统负荷建模是对一条母线或者一条线路上的负荷群进行等值建模, 与一般的动态等值问题非常类似, 不同点在于一般情况下负荷建模所描述的负荷群的内部结构和具体参数是未知的, 而动态等值问题中一般所需进行等值的外部系统的结构和参数都是已知的。

同调等值法是电力系统动态等值理论中一种很重要的方法, 其核心内容是根据系统中的核心动态元件发电机的转子摇摆曲线来划分同调机群, 每个同调机群用一台等值发电机来描述^[12]。

对比同调等值方法研究的被等值外部系统, 发现空调群负荷的特点与其非常相似。同调等值最核心的依据就是发电机的功角变化轨迹, 这是因为发电机功角是表征发电机是否稳定的重要状态变量。而在空调群负荷中, 核心元件是电动机, 表征电动机是否稳定的状态变量是滑差 s , 而且滑差 s 与发电机功角有着形式相同的转子运动方程。

因此, 为将同调等值理论推广到空调群负荷建模中, 对二者进行如下类比分析:

1) 在空调群负荷建模中可将滑差变化轨迹作为电动机负荷是否“同调”的标志; 在同调等值中判断同调的依据是发电机的功角变化轨迹。

2) 在空调群负荷建模中, 关心的是负荷整体的

输入、输出外特性,而不关心负荷内部的动态;同调等值研究的是外部系统,关心的也是外部系统的输入、输出特性,而不关心其内部动态。

3)在空调群负荷建模中,建立的等值模型应能描述不同扰动下的负荷特性,而不依赖于扰动形式和大小;同调等值也不依赖于扰动形式和大小,等值发电机应能描述不同扰动下的系统特性。

4)在空调群负荷建模中,滑差变化轨迹相近的电动机群判为同调时,可用一个等值电动机来描述其特性,若存在多个同调电动机群,则用多个等值电动机来分别描述;同调等值中判为同调的机组群可用一个等值发电机组来描述其特性,若存在多个同调机组群,则用多个等值发电机来描述。

通过类比分,同调等值理论完全可以推广到空调群负荷的动态等值问题中。为区别电力系统常规的同调等值方法,这里将基于滑差的负荷同调等值方法称为滑差同调等值法。

滑差同调等值法虽然是从空调群负荷推出的,但同样适用于其他以电动机群为主的负荷建模。

1.2 空调群负荷动态综合等值模型

根据滑差同调等值理论,如果存在 2 个不同的同调负荷群,只用一个等值电动机来描述将无法精确描述其在暂态过程中的动态特性,这时就应该采用 2 个等值电动机来描述。而对于空调群负荷,当系统出现暂态故障时,正常运行的空调群的滑差变化轨迹与正在启动的空调群的滑差变化轨迹必然不同调。通常,正常运行的空调群的滑差会在初始滑差 s_0 (s_0 一般小于 0.05) 附近变动;而启动空调群的滑差 s ,不论系统是否故障,均会由初值 $s=1$ 开始变化,如果系统最终稳定,那么启动空调群的滑差也会由 $s=1$ 变化到稳定运行时的滑差 s_c (s_c 一般也小于 0.05)。滑差的具体变化轨迹则由各自的转子运动方程决定。

由以上分析可以看出,含有空调群启动过程的负荷模型结构中应该至少包含 2 种电动机等值模型:一种用来描述正常运行的空调群;另一种用来描述空调的启动过程。又因为一般空调群负荷还包含一些附属的控制电路和加热部分,如果线路还有其他静态负荷种类,这里都统一用一个等值静态模型来描述。因此,对于一个空调群占较大比例的综合负荷而言,对其进行建模时,除了原有的“3 阶感应电动机模型+静态负荷模型”的结构外,还应该加上一个描述空调启动动态的电动机模型。

综上所述,含空调群负荷的动态综合等值模型应由 3 个部分构成(如图 1 虚线框内所示):描述正常运行空调群的电动机模型、描述空调群启动特性

的电动机模型、静态负荷模型。

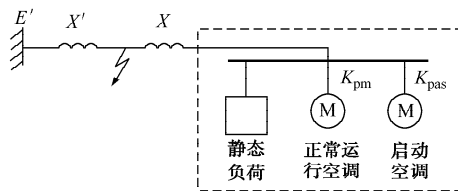


图 1 空调群负荷的动态综合等值模型

Fig. 1 Equivalent model of air conditioner loads

根据暂态稳定分析需要,描述正常运行空调群的电动机模型应采用 3 阶感应电动机模型,静态负荷模型可选用恒阻抗、恒电流、恒功率(ZIP)模型,而描述空调群启动特性的电动机模型如果选用 3 阶感应电动机模型,整个空调群负荷的动态综合等值模型的阶次将为 6 阶,这将给建模过程的参数辨识带来很大的困难。为了参数辨识的便利,这里将描述空调群启动特性的电动机模型简化为 1 阶电动机机械暂态模型。这样,含空调群的综合负荷模型将是一个 4 阶的负荷模型。

1.2.1 3 阶感应电动机模型——正常运行的空调

3 阶感应电动机模型的具体方程可参见文献[13],这里不再重复列出。只是感应电动机部分的输出方程更为常用的形式是功率表达形式:

$$\begin{cases} P_m = u_d i_d + u_q i_q \\ Q_m = u_q i_d - u_d i_q \end{cases} \quad (1)$$

1.2.2 1 阶电动机机械暂态模型——启动空调状态方程为:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (2)$$

式中:

$$T_m = K_L [\alpha + (1 - \alpha)(1 - s)^n]$$

$$T_e = \frac{2T_{\max} U^2}{\left(\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}\right)}$$

输出方程为:

$$\begin{cases} P_{as} = \frac{U^2 R}{R^2 + X^2} \\ Q_{as} = \frac{U^2 X}{R^2 + X^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R 和 X 为电动机稳态等值电路的等值阻抗。

1.2.3 静态负荷模型

ZIP 模型为:

$$\begin{cases} P_s = P_0 (a_P U^2 + b_P U + c_P) \\ Q_s = Q_0 (a_Q U^2 + b_Q U + c_Q) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $a_P + b_P + c_P = 1$; $a_Q + b_Q + c_Q = 1$ 。

1.2.4 综合模型

设阶跃函数 $u(t - t_s)$ 为:

$$u(t-t_s) = \begin{cases} 0 & t < t_s \\ 1 & t \geq t_s \end{cases} \quad (5)$$

则综合负荷功率可表示为:

$$\begin{cases} P = P_m + P_s + P_{as}u(t-t_s) \\ Q = Q_m + Q_s + Q_{as}u(t-t_s) \end{cases} \quad (6)$$

初始稳态时,总负荷有功 $P=P_0$,无功 $Q=Q_0$ 。要确定 3 阶电动机输出功率的大小,引入系数 K_{pm} 表示其中 3 阶电动机的初始有功占初始总负荷有功的比例。要确定启动空调负荷在启动后的输出功率,除了知道启动空调的参数外,还要知道启动空调的容量,因此引入系数 K_{pas} 表示启动空调在稳定后消耗的有功占初始总负荷有功的比例。

这样,综合模型中 3 个模型的待辨识参数,再加上 K_{pm} 和 K_{pas} ,共有 25 个参数。现有的辨识方法很难辨识出如此多的待辨识参数,需要对模型参数合理地简化,主要从以下几方面入手:

1)静态负荷模型在空调群负荷中不反映负荷的主要特征,可简化为恒功率负荷。

2)电动机模型中的机械转矩参数对负荷的输出特性的灵敏度最低,机械特性可用恒转矩代替,负载率 K_L 可以通过负荷初值求出。

3)考虑到空调负荷启动的机群并不是固定不变的,可能为空调群的任何机组,可将 3 阶感应电动机模型与 1 阶电动机机械暂态模型中的电气参数和转动惯量参数合并,即认为二者参数一样,参数表征的是整个空调群的电动机等值参数,也就是认为滑差轨迹变化不同主要是由各自的 s_0 不同造成的。

综合以上 3 点,需辨识的参数简化为以下 9 个: $X_s, X_r, X_m, R_r, R_s, H, s_0, K_{pm}, K_{pas}$ 。

2 阻尼最小二乘法

为了克服 $J_k^T J_k$ 为奇异时高斯-牛顿算法所遇到的困难,Levenberg 提出用式(7)来计算修正量 $\delta^{(k)}$ 。

$$(J_k^T J_k + \nu_k I) \delta^{(k)} = -J_k^T f^{(k)} \quad (7)$$

式中: J_k 为函数 $f^{(k)}$ 的雅可比矩阵; $\nu_k > 0$ 是一个在迭代过程中调整的参数; I 为单位阵; $\delta^{(k)}$ 为待辨识参数的修正量; $f^{(k)}$ 为系统输出的实测值与计算值之间的偏差。

这种方法被称为 Levenberg-Marquardt 算法或阻尼最小二乘法。其后由 Fletcher 对算法进行了修正,将信赖域方法应用于非线性最小二乘问题。因此这种算法又称为 Levenberg-Marquardt-Fletcher (LMF)算法。

由于当 $\nu_k > 0$ 时, $J_k^T J_k + \nu_k I$ 总是正定的,所以式(7)恒有唯一解,并且当 ν_k 很小时, $\delta^{(k)}$ 近似于高

斯-牛顿方向,而当 ν_k 很大时, $\delta^{(k)} \approx -J_k^T f^{(k)} / (\nu_k I)$,即 $\delta^{(k)}$ 偏向于负梯度(最速下降)方向。因此,通过对阻尼因子 ν_k 的调整,可在高斯-牛顿法和最速下降法之间光滑地变动。算法数值实验表明,LMF 算法是当前求解小余量非线性最小二乘问题的最有效算法之一。具体算法步骤可参见文献[14],限于篇幅,这里不再赘述。

3 空调群负荷暂态过程建模

3.1 数据的仿真

空调启动过程由于会产生 3 倍~6 倍于额定功率的有功和无功冲击,因此在系统故障时会进一步恶化系统的电压水平,给系统电压稳定带来非常不利的影响。为描述这一过程的启动影响,应采用空调的启动模型来更准确地描述空调的动态特性。

仿真系统如图 1 所示。仿真平台采用 MATLAB/Simulink 的 simPowersystem 电力系统仿真模块,负荷通过阻抗为 X 的输电线与无穷大系统相连。静态负荷用恒功率模拟,正常运行空调和启动空调的有功分别占初始总负荷有功的 K_{pm} 和 K_{pas} ,都用 simPowersystem 中自带的标准感应电动机模型来模拟,其中 $K_{pm} = 65.12\%$, $K_{pas} = 9.3\%$ 。以上所使用的模型均为 MATLAB 自带的标准模型,空调启动部分可通过设置电动机的初始滑差为 1 来实现启动的动态过程模拟。

模拟故障为:系统在 $t=0.1$ s 发生三相短路经阻抗接地故障,在 $t=0.5$ s 故障清除。在故障期间 $t=0.2$ s 时,有空调启动。

仿真的负荷电压和功率曲线见图 2 和图 3。可以看出,当 $t=0.2$ s 空调启动时,有功和无功突然有了一个较大的增长,造成电压下降,使得在故障影响下的电压状态更加恶化。

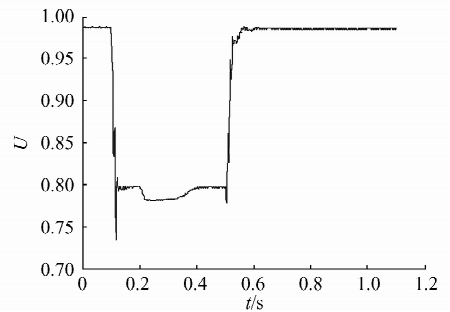


图 2 电压曲线
Fig. 2 Voltage curve

3.2 模型辨识

用 LMF 算法对上述仿真数据进行空调群负荷动态综合等值模型的建模,辨识结果见表 1,图 4 为

拟合曲线。由辨识结果和拟合结果来看,本文提出的空调群负荷动态综合等值模型和 LMF 辨识方法能够比较准确地进行空调群负荷的建模。

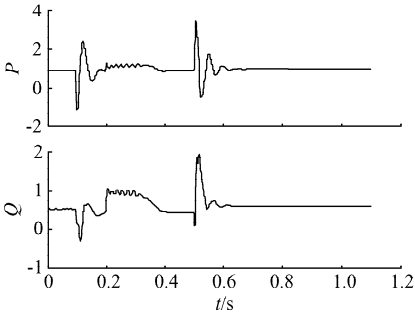


图 3 功率变化曲线
Fig. 3 Power curves of starting

表 1 辨识结果
Table 1 Result of identification parameters

参数	真值	辨识值
X_s	0.039 7	0.044 5
X_r	0.039 7	0.045 9
X_m	1.354 0	1.491 3
R_r	0.019 1	0.017 0
R_s	0.020 0	0.026 8
H	0.095 3	0.088 9
s_0	0.011 6	0.014 0
K_{pm}	0.651 2	0.684 2
K_{pas}	0.093 0	0.088 2

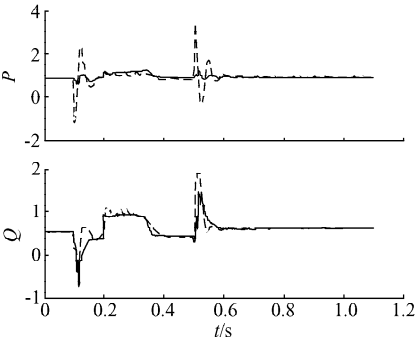


图 4 空调群负荷建模功率拟合曲线
Fig. 4 Fitting curves of power

3.3 传统综合负荷模型的局限性

若采用传统的“3 阶感应电动机模型+静态负荷模型”(以下简称为传统的 D+Z 模型)对 3.1 节中的例子进行建模,由于传统的 D+Z 模型中没有对空调群负荷中出现的启动空调的特性进行描述,因此传统的 D+Z 模型不会在 $t=0.2\text{ s}$ 时突然增长消耗的有功和无功,也就不会引起电压在这一时间发生进一步跌落的现象,采用传统的 D+Z 模型建模的功率拟合曲线如图 5 所示。比较图 4 和图 5,

可以看到本文所提出的基于滑差同调等值的空调群负荷动态综合等值模型在对空调群负荷特性的效果上,要明显优于传统的 D+Z 模型。

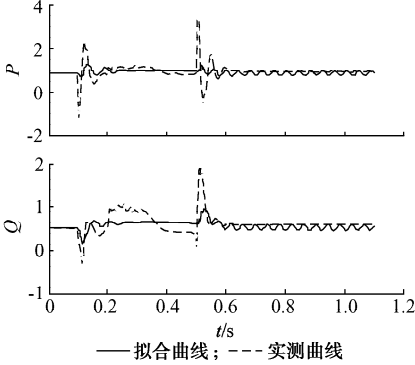


图 5 传统负荷模型功率拟合曲线
Fig. 5 Fitting curves of power of traditional load model

3.4 基于滑差同调等值的空调群负荷动态综合等值模型的适应能力

为考察本文提出的基于滑差同调等值的空调群负荷动态综合等值模型的适应能力,分别对启动状态的空调占 20%,5%,2%这 3 种情况进行建模,拟合曲线见图 6,其中图 6(c)还给出了采用传统的 D+Z 模型的拟合比较曲线。由图 6 可以看到,对于这几种情况,本文所提出的模型均能较为准确地描述空调群的负荷特性,说明本文提出的空调群负荷模型具有较好的模型适应能力。

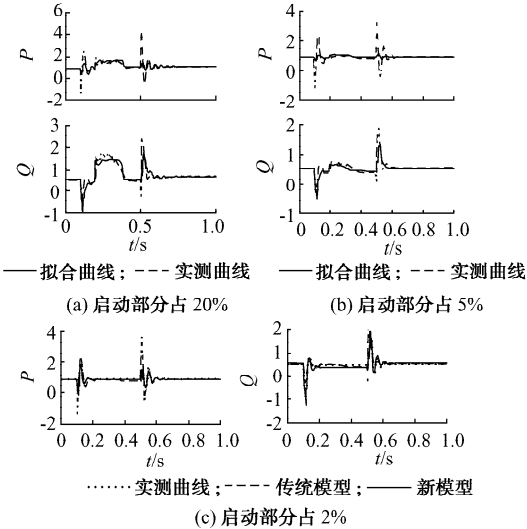


图 6 不同启动比例下功率拟合曲线
Fig. 6 Fitting curves of power on different ratios

另外,注意到当启动状态的空调比例较小(占 2%,见图 6(c))时,随这一小部分空调的启动,整体空调群负荷的功率变化已经比较小,引起的电压降落也比较小,这种情况下采用传统的 D+Z 模型来

近似描述,效果与本文提出的基于滑差同调等值的空调群负荷动态综合等值模型相差不大,也就是说在启动状态的空调所占比例小于2%时,既可选用本文提出的基于滑差同调等值的空调群负荷动态综合等值模型,也可选用传统的D+Z模型。

4 结语

本文采用同调等值法的概念开展空调群的负荷建模,提出了基于滑差同调等值的负荷建模方法和模型,用阻尼最小二乘法对含空调启动特性的空调群综合负荷进行建模,通过仿真验证了建模方法的有效性,并说明了该建模方法具有较好的适应能力。

参考文献

[1] 李树江,吕梁年,王向东,等.暖通空调制冷系统建模与控制现状及发展趋势.沈阳工业大学学报,2007,29(3):300-306,311.
LI Shuijiang, LÜ Liangnian, WANG Xiangdong, et al. Developing status and trend of modeling and control of chiller system in HVAC systems. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(3): 300-306, 311.

[2] 陈铁成,张艳红.用科学发展观指导首都电力需求侧管理工作.电力需求侧管理,2006,8(5):7-8.
CHEN Tiecheng, ZHANG Yanhong. Taking the view of scientific development to guide capital DSM work. Power Demand Side Management, 2006, 8(5): 7-8.

[3] KURITA A, SAKURAI T. The power system failure on July 23, 1987 in Tokyo// Proceedings of the 27th Conference on Decision and Control: Vol 3, December 7-9, 1998, Austin, TX, USA; 2093-2097.

[4] 韩北渝,王漪,李晓明,等.空调负荷对电压稳定影响的研究.继电器,2000,28(8):25-27,31.
HAN Beiyu, WANG Yi, LI Xiaoming, et al. Study on the effect of air conditioner load on voltage stability. Relay, 2000, 28(8): 25-27, 31.

[5] RIVERA SANHUEZA S M, TOFOLI F L, DE ALBUQUERQUE F L, et al. Analysis and evaluation of residential air conditioners for power system studies. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 706-716.

[6] 李育燕,陈谦,黄文英,等.空调群负荷动态特性分析与建模.高电压技术,2007,33(1):66-69,77.

LI Yuyan, CHEN Qian, HUANG Wenyong, et al. Dynamic characteristics and modeling of air conditioner loads. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 66-69, 77.

[7] 徐群,刘刚,李育燕,等.单台空调负荷动态特性分析与建模.高电压技术,2006,32(11):127-130.
XU Qun, LIU Gang, LI Yuyan, et al. Characteristic analysis and modeling of a single air conditioner load. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 127-130.

[8] 鞠平,谢会玲,陈谦.电力负荷建模研究的发展趋势.电力系统自动化,2007,31(13):42-46.
JU Ping, XIE Huiling, CHEN Qian. Research tendencies of electric load modeling. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 42-46.

[9] 鞠平,何孝军,黄丽,等.广义电力负荷的模型结构与参数确定.电力系统自动化,2006,30(23):11-13.
JU Ping, HE Xiaojun, HUANG Li, et al. Model structures and parameter estimation of generalized loads. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 11-13.

[10] 李村晓,李欣然,陈辉华,等.基于单点最优辨识的综合负荷广义感应电动机模型.电力系统自动化,2007,31(13):42-46.
LI Cunxiao, LI Xinran, CHEN Huihua, et al. Generalized induction motor model of synthetic load based on simple-point optimum identification. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 42-46.

[11] 谢会玲,鞠平,陈谦,等.广域电力系统负荷整体建模方法.电力系统自动化,2008,32(1):1-5.
XIE Huiling, JU Ping, CHEN Qian, et al. Electric load modeling for wide area power systems. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 1-5.

[12] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析.北京:清华大学出版社,2002.

[13] TAYLOR W. Power system voltage stability. New York, NY, USA: McGraw-Hill Inc, 1994: 75.

[14] 席少霖.非线性最优化方法.北京:高等教育出版社,1992.

郑竞宏(1974—),男,通信作者,硕士,讲师,主要研究方向:电力系统负荷建模、电能质量、分布式电源。E-mail: zjh98@mails.tsinghua.edu.cn

朱守真(1950—),女,教授,主要研究方向:电力系统四大参数建模、分布式电源并网、电能质量。E-mail: zsz@mail.tsinghua.edu.cn

Slip Coherency Based Approach for Air Conditioning Load Modeling

ZHENG Jinghong, ZHU Shouzhen

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Air conditioning loads have been growing quickly in recent years, which will have increasing impact on power system transient voltage stability. In order to model such loads including their starting characteristics, a slip coherency based approach is presented to determine the structure of the load model. The Levenberg-Marquardt-Fletcher (LMF) method is used to identify the load model parameters. Finally, a simulation example is given to prove the validity of the proposed method.

This work is supported by the Grand Project of National Natural Science Foundation of China (No. 50595412).

Key words: slip coherency based approach; modeling of air conditioning loads; LMF methods; air conditioner starting modeling