

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190975

基于扩张状态观测器的非线性最优变频空调频率控制

康忠健, 李锴绩, 常铮

(中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 空调系统作为办公建筑耗电量最大的用电设备之一, 在一些大中城市的所有负荷中, 空调负荷已经占到夏季尖峰负荷的30%~40%。因此在保证所处环境中人的舒适性前提下, 研究变频空调频率的最优节能控制, 对促进节能减排, 构建节约型社会具有重要意义。应用DIGSILENT仿真软件, 搭建基于电磁暂态的变频空调模型, 包含变频器模型、电动机模型、压缩机模型和热交换模型。由于变频空调以往的频率控制方式算法复杂, 精度较低, 误差较大。因此从压缩机频率控制器入手, 设计了基于扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)的非线性最优变频空调频率控制器。通过仿真分析, 验证了基于ESO的非线性最优控制的变频空调频率控制器能够提高空调温度的控制精度并且降低能量的损耗。

关键词: 热交换模型; 压缩机模型; 频率控制模型; 扩张状态观测器; 非线性最优控制

Frequency control of inverter air conditioning based on ESO nonlinear optimal control

KANG Zhongjian, LI Kaiji, CHANG Zheng

(College of New Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The air conditioning system is one of the most power-intensive pieces of electrical equipment in an office building. In some large and medium-sized cities, the air conditioning load has accounted for 30% to 40% of peak load in summer. On the premise of guaranteeing the necessary comfort of people in the environment, it is of practical significance to study the optimal energy-saving control of frequency conversion air-conditioning frequency for promoting energy-saving and emission reduction and building a conservation-oriented society. Using DIGSILENT simulation software, a frequency conversion air conditioning model based on an electromagnetic transient is built. This includes the frequency converter, motor, compressor and heat exchange models. Due to the complexity of the algorithm, there is low precision and large error in previous frequency control methods of frequency conversion air conditioning. Therefore, starting from the compressor frequency controller, a frequency controller based on Extended State Observer (ESO) nonlinear optimal control is designed under the traditional PI control mode. The simulation results show that frequency control based on ESO and nonlinear optimal control can improve temperature control precision and reduce energy loss.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60971077) and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (Techniques and Application Research of Load Modeling Considering High-proportion Electrical and Electronic Equipment).

Key words: heat exchange model; compressor model; frequency control model; ESO; nonlinear optimal control

0 引言

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高, 人们对所处环境舒适度要求越来越高。由于空调系

统能够为人们提供舒适的环境温度, 并且在办公建筑总能耗中空调系统占有较大比例, 在一些大中城市空调负荷已占到夏季尖峰负荷的30%~40%^[1-2]。因此在保证所处环境中人的舒适性前提下, 研究空调系统的最优节能控制, 对建设资源节约型社会有十分重要的意义。

在空调的整个系统中空调压缩机是核心部分, 它对于空调系统的性能起着至关重要的作用^[3], 变

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(60971077); 国家电网有限公司总部科技项目资助“含高比例电力电子化设备的负荷建模技术及应用研究”

变频空调通过改变压缩机的频率来控制室温变化。目前大多数的变频空调是以当前室温与用户温度设定值之间的温度差为依据确定压缩机运行频率^[4-9]的。例如：文献[5]采用 180 度正弦波控制技术，压缩机电机绕组同时通电，绕组两端电压是正弦波电压，此控制方式虽然绕组的利用率高，但是控制算法复杂，且对处理器要求较高。文献[6-8]采用 PID 闭环控制的方法，由于室外温度、室内负荷不一定是线性变化，此控制方式控制精度较低，有较大误差。文献[9]采用模糊控制技术，此控制方式不依赖于被控对象的精确数学模型，可以实现智能的制冷量变化，但是模糊控制表在模糊化时量化等级有限、模糊化方法简单也会导致其控制精度打折扣。

然而在自抗扰技术^[10]中，扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 不仅可以有效准确地估计出系统中的状态变量，还能观测出系统模型中的外部干扰，因此无需事先给出精确的数学模型。并且对于难以确定控制量增益的系统，也可以较为精确地实时估计出状态变量^[11-14]。在扩张状态观测器的基础上，对非线性最优控制技术进行研究，实现非线性系统简化为线性系统并进行控制设计^[15-16]。本文针对上述变频空调压缩机频率控制研究现状以及非线性最优控制理论，从压缩机频率控制器入手，设计了基于 ESO 的非线性最优控制的变频空调频率控制器，利用 DIgSILENT 软件搭建变频空调模型，设计控制器进行室内温度变化仿真，验证了控制方法能够提高室内温度的控制精度并且降低变频空调的能量损耗。

1 变频空调模型搭建

普通民用变频空调的工作原理如图 1 所示，其主要由整流器、滤波器、功率逆变器以及变频压缩机组成。



图 1 交流变频控制器工作原理

Fig. 1 Working principle of AC frequency converter controller

首先将电压 220 V，频率 50 Hz 的交流电整流，再通过滤波后得到大约 310 V 的直流电，此直流电根据室内温度的变化逆变为频率在 30~130 Hz 范围内的可以用来控制压缩机转速的电源，从而可以控制制冷量输出的大小。对变频空调的压缩机进行频率的控制，当房间内的热负荷加大，压缩机在微机的控制下运转速度更快，使得制冷(热)量增加；当

室内的热负荷减小时，在微机控制下的压缩机将在控制方式下进行相应的减小。因此变频空调器具有高效、节能、启动运转灵活等特点。

1.1 基于一阶状态方程的空调负荷热交换模型

空调热量交换过程始终遵循能量平衡原理，即将电功率转变为空调的热功率，将室内与室外进行负荷的热量交换，最终使室内温度维持在了设定温度。那么空调负荷工作过程热交换过程^[17-20]如图 2 所示。

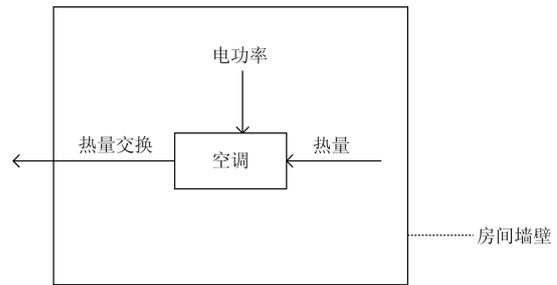


图 2 空调热量交换过程

Fig. 2 Heat exchange process of air conditioning

根据空调热交换过程可建立基于一阶状态方程的空调负荷模型^[21]，如式(1)、式(2)所示。

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{RC}(T_0(t) - T(t)) - \frac{1}{C}m(t) \cdot Q \quad (1)$$

$$m(t_{n+1}) = \begin{cases} 0, & T < T_- \\ 1, & T > T_+ \\ m(t), & T_- < T < T_+ \end{cases} \quad (2)$$

式中： $T(t)$ 为 t 时刻室内温度； $T_0(t)$ 为 t 时刻室外的温度； R 为室内墙壁等效热阻值； C 为室内墙壁等效热容值； Q 是空调整冷量； $m(t)$ 为 t 时刻变频空调的开关状态，0 或 1； T_- 、 T_+ 表示空调关闭边界温度和开启边界温度的设定值。

1.2 空调压缩机模型

在变频空调系统中，压缩机是主要的功率消耗器件，该建模是在忽略了小功率风机等设备的情况下建立的。空调压缩机在空调整冷剂回路中起压缩驱动制冷剂的作用。空调压缩机从低压区抽取制冷剂，压缩后送至高压区进行冷却和冷凝，热量通过散热器排放到空气中，制冷剂也从气态变为液态，压力升高^[22-23]。

滚动活塞式压缩机是新一代家用制冷器具用压缩机，其依靠偏心安设在汽缸内的旋转活塞在圆柱形汽缸内作滚动运动和一个与滚动活塞相接触的滑板的往复运动实现气体压缩。其腔内几何图形如图 3 所示。

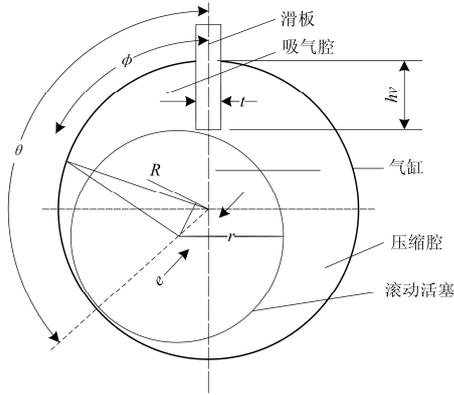


图3 滚动活塞式压缩机腔内几何图形

Fig. 3 Geometry of rolling piston compressor cavity

参照文献[22-23]往复式压缩机指示功的推导过程, 可求出滚动活塞式压缩机功率的计算式(3), 考虑到制冷量工作环节转动一周有时间消耗, 因此制冷量在计算时加上一惯性环节, 得出算式(4)。

$$P = p_1 \lambda_v V_h n \frac{k_T}{k_T - 1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_T - 1}{k_T}} - 1 \right] \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_1} \quad (3)$$

$$Q = EER \times P \times \frac{1}{1 + T_S} \quad (4)$$

式中: p_1 、 p_2 为吸气孔、排气孔压强, pa; λ_v 为压缩机容积系数; V_h 为压缩机工作容积; n 为电机转速, r/s; K_T 为绝热指数; Z_1 、 Z_2 为吸气、排气压缩因子; EER 为制冷能效比。

1.3 空调频率控制模型

变频空调的频率控制如图4所示。

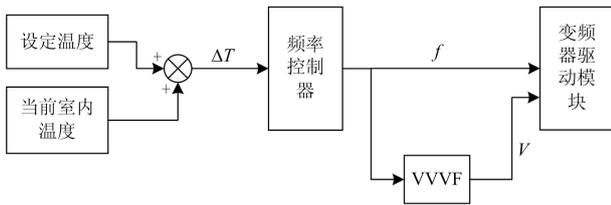


图4 变频空调频率控制框图

Fig. 4 Frequency control block diagram of frequency conversion air conditioning

当前室内温度和设定温度的差作为输入量, 输送到频率控制器中, 频率控制器依据温度差以及频率控制方式算出此时所需频率。由于电机磁通 ϕ 与 U_1 / f 的比值成正比, 对于磁通 ϕ , 希望磁通接近饱和值, 因此要保持磁通恒定, 当频率 f 改变时, 必须同时改变电动机定子电压 U_1 , 即在变频的同时也要变压, 这种调节转速的方法称为 V/f 控制

(Variable Voltage Variable Frequency, VVVF)。变频空调器的 V/f 曲线如图5所示。

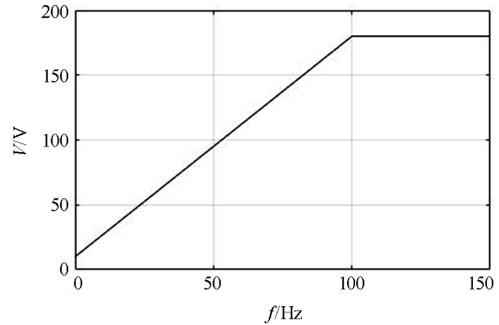


图5 变频压缩机的 V/f 曲线图

Fig. 5 V/f curve of frequency conversion compressor

2 基于 ESO 的非线性最优频率控制器设计

变频空调的控制流程为: 首先将当前温度 T_{in} 和设定温度 T_{ref} 做差得到的温度差作为输入量输入到频率控制环节, 频率控制环节根据控制方式的不同计算出当前变频器所需的频率, 再根据空调 V/f 曲线图计算得到所需电压, 并将所得电压、频率作为输入量输给变频器, 变频器控制电机负载导致其拉动压缩机的转速改变, 从而压缩机输出的制冷量 Q 发生变化, 根据热交换模型可计算得到此时室内温度变化, 从而可以得到此时室内温度, 最终形成一个闭环, 如图6所示。

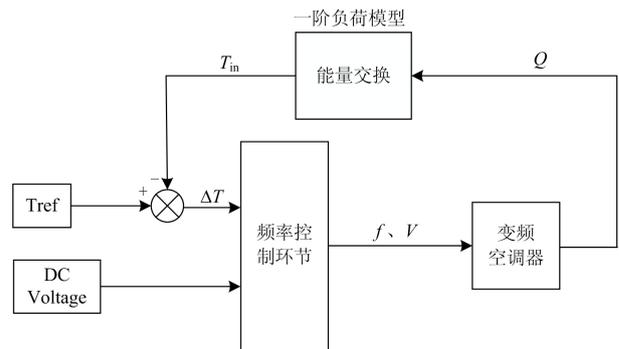


图6 变频空调控制框图

Fig. 6 Frequency conversion air conditioning control block diagram

针对一般的变频空调控制, 对频率控制环节进行重新设计, 在 PI 控制的基础上加入一基于 ESO 的非线性最优频率控制下的附加信号 Δf [24-27], 如图7所示。

在频率控制环节加入附加信号 Δf 后系统可以写为如式(5)所示的标幺值形式:

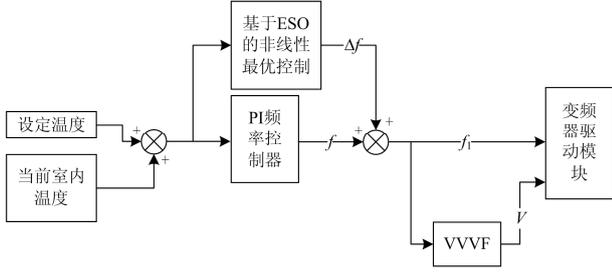


图 7 加入附加信号的频率控制器

Fig. 7 Power-frequency controller adding extra signal

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{T_0 - T}{RC} - \frac{Q}{C} \\ \dot{Q} = \frac{EER \cdot P - Q}{T_r} \\ P = p_1 \lambda_v V_h n \frac{k_r}{k_r - 1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_r - 1}{k_r}} - 1 \right] \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_1} \end{cases} \quad (5)$$

令 $K_1 = p_1 \lambda_v V_h \frac{k_r}{k_r - 1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k_r - 1}{k_r}} - 1 \right] \frac{Z_1 + Z_2}{2Z_1}$ ，则

$P = K_1 \cdot n$ ，将其整理为二阶、三阶系统如式(6)、式(7)所示。

$$\dot{\Delta T} = \frac{\dot{T}}{T_r} - \frac{\dot{T}}{RC} + \frac{T}{T_r RC} - \frac{P \cdot EER}{T_r C} - \frac{T_0}{T_r RC} \quad (6)$$

$$\ddot{\Delta T} = \frac{\ddot{T}}{T_r} - \frac{\ddot{T}}{RC} + \frac{\dot{T}}{T_r RC} - \frac{K_1 \cdot \dot{n} \cdot EER}{T_r RC} - \frac{T_0}{T_r} \quad (7)$$

其中忽略阻尼转矩和扭转弹性转矩，运动控制系统的基本运动方程为

$$J \frac{d\omega_n}{dt} = T_e - T_L \quad (8)$$

在频率调速过程中采用 VVVF 控制方式，保持

$\frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$ ，则式(8)可表示为

$$\frac{GD^2}{375} \cdot \dot{n} = \frac{m_1 p}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{\Delta f_1 \frac{R'_2}{s}}{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} - T_L \quad (9)$$

式中： GD^2 为转动惯量； m_1 为定子相数； p 为极对数； s 为转差率； R_1 为定子侧电阻； R'_2 为转子侧电阻折算到定子侧值； $X_{1\sigma}$ 为定子绕组的漏电抗； $X'_{2\sigma}$ 为转子侧电抗折算到定子侧值； T_L 为负载转矩，由式(3)可知压缩机功率 P 与转速 n 成正比，所以 T_L 为恒转矩负载。

将式(9)代入式(7)可化简得：

$$\begin{cases} \ddot{\Delta T} = \frac{\ddot{T}}{T_r} - \frac{\ddot{T}}{RC} + \frac{\dot{T}}{T_r RC} - \frac{K_2 \cdot \Delta f \cdot EER}{T_r RC} - \frac{375 T_L \cdot K_1 \cdot EER}{GD^2 \cdot T_r RC} - \frac{T_0}{T_r} \\ K_2 = \frac{375 m_1 p}{2\pi \cdot GD^2} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{\frac{R'_2}{s}}{(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2} \cdot K_1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{令 } a(t) = \frac{\dot{T}}{T_r} - \frac{\dot{T}}{RC} + \frac{T}{T_r RC} - \frac{375 T_L \cdot K_1 \cdot EER}{GD^2 \cdot T_r RC} - \frac{T_0}{T_r},$$

$$b = \frac{K_2 \cdot EER}{T_r RC}, \quad u(t) = \Delta f, \quad x_1 = \Delta T, \quad x_2 = \dot{\Delta T},$$

$x_3 = \ddot{\Delta T}$ ，则系统可改写为式(11)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = a(t) + bu(t) \end{cases} \quad (11)$$

对于所得到的三阶系统，可以设计四阶 ESO 对状态变量 x_1 、 x_2 、 x_3 以及外部不确定因素进行实时估计，四阶 ESO 如式(12)所示。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \frac{k_1}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \frac{k_2}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_3 = z_4 - \frac{k_3}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) + bu(t) \\ \dot{z}_4 = -\frac{k_4}{g'(z_1 - x(t))} g(z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (12)$$

式中： z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 分别是对 x_1 、 x_2 、 x_3 和外部不确定因素 $w(t)$ 的估计值； k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 根据“参数动态确定法”，可以使得系统状态方程的特征根全部落在复平面的左半平面，从而保证系统在外部干扰下的稳定性； $b = \frac{K_2 \cdot EER}{T_r RC}$ 是与系统有关的常量，

$g(z)$ 函数选取为 $\text{fal}(z, \alpha, \delta)$ 函数，其具体表达式如公式(13)所示。

$$g(z) = \text{fal}(z, \alpha, \delta) = \begin{cases} |z|^\alpha \text{sign}(z), & z \geq \delta \\ \frac{z}{\delta^{1-\alpha}}, & z < \delta \end{cases} \quad (13)$$

式中： $\alpha = 0.5$ ， $\delta = 0.01$ 。

对式(11)所表示的非线性不确定系统，运用非线性最优控制进行附加频率控制设计，可得其控制律为

$$u(t) = [(-K_1x_1 - K_2x_2 - K_3x_3) - a(t)] / b \quad (14)$$

对式(10)所表示的非线性不确定系统, 采用状态扩张观测器对各个状态变量 x_i 进行观测, 调节 ESO 的参数, 从而得到各状态变量 x_i 的估计值 z_i 以及扩张状态 $z_{n+1} = a(t)$ 。因此最终附加频率控制信号用 z_i 表示为

$$u(t) = \frac{(-K_1z_1 - K_2z_2 - K_3z_3) - z_4}{b} \quad (15)$$

依据上述分析, 基于 ESO 的非线性最优控制器的结构如图 8 所示。

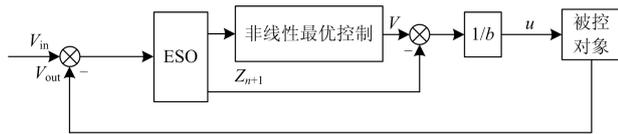


图 8 基于扩张状态观测器的非线性最优结构控制框图
Fig. 8 Nonlinear robust structure control block diagram based on extended state observer

3 仿真分析

3.1 变频空调控制器搭建

DIgSILENT 中设计的变频空调控制框架如图 9 所示。

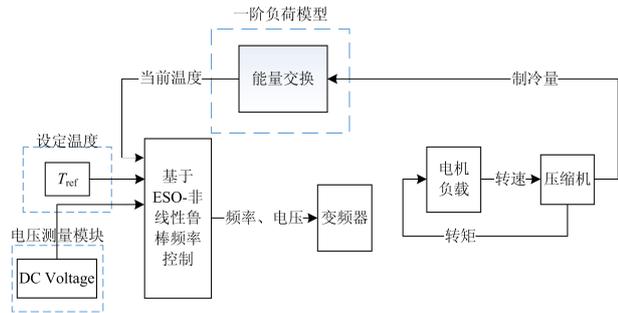


图 9 变频空调控制框图

Fig. 9 Frequency conversion air conditioning control block diagram

先对 PI 控制方式变频空调的频率控制进行仿真分析, 仿真条件如表 1 所示。

表 1 基于 PI 控制方式参数表

Table 1 Parameter table based on PI control mode

PI 控制参数		环境温度初始值/°C		
K	T	T_{out}	T_{in}	T_{ref}
20	5	40	35	26

在上述参数下室内温度与空调制冷量仿真结果如图 10 和图 11 所示。

在上述条件下可得室内温度变化如表 2 所示。

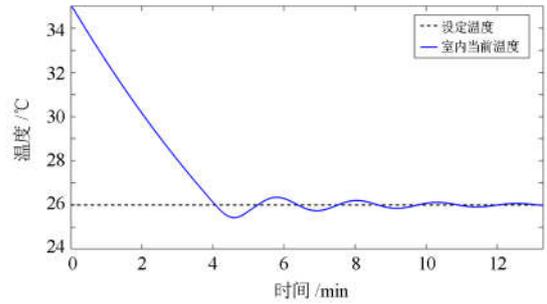


图 10 PI 控制方式下室内温度变化

Fig. 10 Temperature change under PI control mode

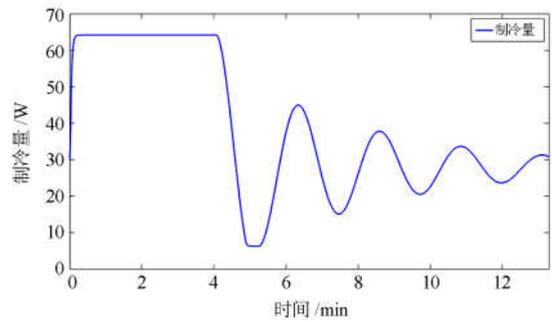


图 11 PI 控制方式下制冷量变化

Fig. 11 Change of refrigeration capacity under PI control mode

表 2 温度变化时间表

Table 2 Temperature change schedule

室内温度/°C	时间/s
首次达到设定温度	243
振荡幅度小于 0.3	346
振荡幅度小于 0.2	482
振荡幅度小于 0.1	680

由表 2 可知, 在 PI 控制方式下室内温度振荡幅度大, 振荡时间长, 因此在此环境的人舒适度感觉较差。并且因为温度变化较大, 空调制冷量的输出振荡较大, 消耗了较多的能量。

3.2 基于 ESO 的非线性最优频率控制

通过设计, 在 PI 控制频率调节环节加入基于 ESO 的非线性最优附加控制与无附加 PI 控制的频率控制器进行仿真比较。仿真条件设置如表 3 所示。

表 3 基于 ESO 的非线性最优控制器参数表

Table 3 Parameter table of nonlinear robust controller based on ESO

ESO 参数				非线性最优控制器参数			
k_1	k_2	k_3	k_4	K_1	K_2	K_3	b
100	3 750	62 500	390 625	223.61	73.86	12.19	-23 000

在 DigSILENT 中分别设置仿真参数,加入 ESO 的非线性最优控制进行室内温度和空调制冷量变化仿真结果如图 12 和图 13 所示。

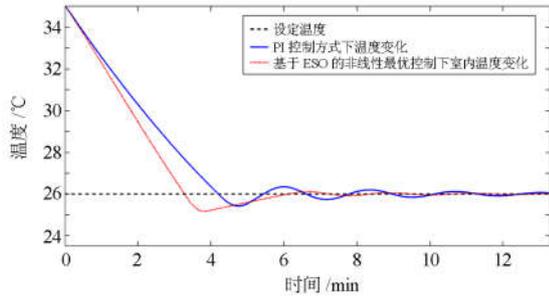


图 12 不同控制方式下室内温度变化

Fig. 12 Temperature variation under different control modes

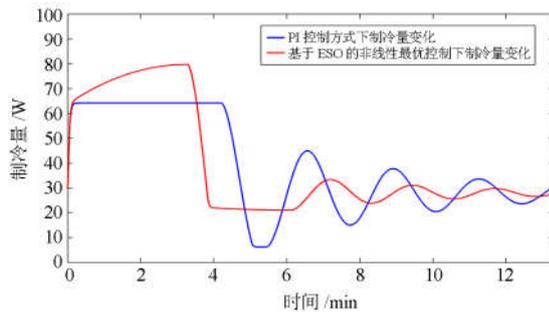


图 13 不同控制方式下制冷量变化

Fig. 13 Variation of refrigeration capacity under different control modes

在表 3 设定条件下,空调在不同控制方式下从室内温度 35 °C 稳定到设定温度 26 °C 时,室内温度与消耗总制冷量变化如下。

1) 室内温度变化如表 4 所示。

表 4 不同控制方式下温度变化表

Table 4 Temperature change schedule under different control modes

室内温度/°C	PI 控制所用时间/s	基于 ESO 的非线性最优控制所用时间/s
首次达到设定温度	243	195
再次达到设定温度	252.3	371
振荡幅度小于 0.2	482	395
振荡幅度小于 0.1	680	452

由表 4 可知,本文方法在第 195 s 第一次到达设定温度,比无附加控制的 PI 控制提高了 50 s,但是其超调量较大,偏离设定温度 0.83 °C,而在无附加控制的 PI 控制下偏离只有 0.57 °C。虽然本文方法在 371 s 后再次到达设定温度比无附加控制的 PI 控制所耗时间长,但是本文方法能够使空调快速稳

定到设定温度,即 452 s 后室内温度振荡幅值就可达到 0.1 °C 以内,室内温度振荡时间较短且幅值较小,人在此环境空间内感到比较舒适。然而,无附加控制的 PI 控制需要在 680 s 后才能达到设定温度,故本文法在控制时间上优于无附加控制的 PI 控制。

2) 消耗总制冷量如表 5 所示。

表 5 不同控制方式下总制冷量对比表

Table 5 Contrast table of total refrigeration capacity under different control modes

控制方法	消耗总制冷量/(W·min)
PI 控制	689.591 9
基于 ESO 的非线性最优控制	678.781 5

由表 5 可知,空调从室内温度 35 °C 稳定到设定温度 26 °C 时,本文方法比 PI 控制方法总消耗制冷量减少 10.8 W·min,即减少了 1.6%。然而,我国自从 2016 年开始变频空调的市场占有率已达到 60%^[28],按照我国三亿个家庭,每个家庭一台空调计算,本文方法在空调从启动至达到设定温度这段时间内所节约的用电成本相当可观。从而本文方法在经济上优于无附加控制的 PI 控制方法,故本文方法的实用价值较高。

4 总结

本文基于变频空调频率控制技术,在 DigSILENT 中搭建了空调一阶热交换模型、压缩机模型以及频率控制模型,并对其中的频率控制环节加入基于 ESO 的非线性最优控制,通过仿真进行分析,可以得到以下结论:

1) 在变频空调频率控制环节加入基于 ESO 的非线性最优控制之后,有效提高了系统鲁棒性,不仅能更快地到达所设定的温度,并且振荡幅度较小,有利于提高人体舒适度。

2) 采用本文方法后明显减少空调制冷量的消耗,降低了用电成本,减少了能源的消耗,为我国资源节约型社会的建设以及环境的维护有着极大的意义。

3) 本文提出的基于 ESO 的非线性最优频率控制器的设计过程简单、实现容易,并且对参数的依赖很小,改善了控制性能,因此具有较高的应用价值。

参考文献

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2014[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

- [2] 黎灿兵, 尚金成, 朱守真, 等. 气温影响空调负荷的累积效应导致能耗的分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 30-33.
LI Canbing, SHANG Jincheng, ZHU Shouzhen, et al. An analysis of energy consumption caused by air temperature-affected accumulative effect of the air conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 30-33.
- [3] 张颢. 变频空调控制系统的设计与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
ZHANG Xie. Design and implementation of vary-frequency air conditioner control system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [4] 宁波奥克斯空调有限公司. 一种变频空调在夜间的控制方法: 中国, CN201310029098.9[P]. 2013-05-08.
- [5] 郭清风, 梁博, 张有林, 等. PMSM 驱动控制系统在变频空调中的应用[J]. 电力电子技术, 2011, 2(3): 38-40.
GUO Qingfeng, LIANG Bo, ZHANG Youlin, et al. Application of PMSM drive system in air-conditioning[J]. Power Electronics, 2011, 2(3): 28-40.
- [6] KUO J L, CHANG Z S. Intelligent sensorless control of two-phase linear brushless DC motor based on a recurrent fuzzy neural network[J]. Control and Intelligent System, 2008, 36(2): 161-168.
- [7] XIA C L, FANG H W, CHEN W, et al. Ant colony algorithm based fuzzy control for a brushless DC motor[C] // IEEE Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21-23, 2006, Dalian, China: 6498-6502.
- [8] LI Z Q, XIA C L. Speed control of brushless DC Motor based on CMAC and PID controller[C] // IEEE Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21-23, 2006, Dalian, China: 6318-6322.
- [9] 王斌. 变频空调温度复合模糊控制研究[J]. 家电科技, 2016(增刊 1): 129-131.
WANG Bin. Study on temperature compound fuzzy control of inverter air-conditioner[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2016(S1): 129-131.
- [10] 马星河, 张少辉, 李自强, 等. 一种用于矩阵变换器的简化非线性自抗扰控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 48-60.
MA Xinghe, ZHANG Shaohui, LI Ziqiang, et al. A simplified nonlinear auto disturbance rejection control strategy for matrix converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 48-60.
- [11] LIU H, LI S H. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [12] 刘静, 黄磊, 康忠健. 基于自抗扰控制技术的双馈型感应发电机功率解耦控制[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(1): 57-61.
LIU Jing, HUANG Lei, KANG Zhongjian. Decoupling control of power in double-fed induction generator based on auto-disturbance rejection control technology[J]. Electric Machines & Control Application, 2012, 39(1): 57-61.
- [13] 刘安东, 张荣超, 俞立, 等. 基于扩张状态观测器的分散模型预测控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1093-1098.
LIU Andong, ZHANG Rongchao, YU Li, et al. Extended state observer-based decentralized model predictive control[J]. Control and Decision, 2016, 31(6): 1093-1098.
- [14] 康忠健, 陈学允. 非线性扩张状态观测器的一种设计方法[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(3): 199-203.
KANG Zhongjian, CHEN Xueyun. A design method of nonlinear extension state observer[J]. Electric Machines and Control, 2001, 5(3): 199-203.
- [15] 刘金焜. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 360-362.
- [16] 罗建, 任成君, 冯树辉, 等. 基于线性最优控制和积分控制的励磁控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 134-140.
LUO Jian, REN Chengjun, FENG Shuhui, et al. Design of excitation controller based on linear optimal control and integral control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 134-140.
- [17] 鹿建成, 李啸骢, 黄维, 等. 基于 SSSC 和励磁协调抑制次同步振荡的线性最优控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 21-27.
LU Jiancheng, LI Xiaocong, HUANG Wei, et al. Linear optimal controller of static series synchronous compensator and excitation to suppress sub-synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 21-27.
- [18] XIE Kang, HUI Hongxun, DING Yi. Review of modeling and control strategy of thermostatically controlled loads for virtual energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 283-295. DOI: 10.1186/s41601-019-0135-3.
- [19] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018,

- 46(7): 14-23.
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 14-23.
- [20] 方健, 梁国开, 栾乐, 等. 考虑 DLC 空调轮控的配电网无功优化协调方法[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 95-102.
FANG Jian, LIANG Guokai, LUAN Le, et al. Optimization and coordination method for reactive power of distribution network considering DLC air-conditioning load cycle control[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 95-102.
- [21] 李娜, 王晓亮. 集群空调负荷提供微电网调频备用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 101-105.
LI Na, WANG Xiaoliang. Research of air conditioners providing frequency controlled reserve for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 101-105.
- [22] 马国远. 滚动活塞式压缩机的动力计算[J]. 广东机械学院学报, 1994, 12(4): 92-100.
MA Guoyuan. Dynamic analysis of rolling piston type rotary compressors[J]. Industrial Engineering Journal, 1994, 12(4): 92-100.
- [23] 马国远, 李富平. 滚动活塞式压缩机的热力计算[J]. 郑州轻工业学院学报, 1993(4): 54-60.
MA Guoyuan, LI Fuping. Thermodynamic analysis for rolling piston type compressor[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry, 1993(4): 54-60.
- [24] 李鑫, 康忠健, 常铮, 等. 基于ESO和终端滑模控制的虚拟同步发电机研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 65-72.
LI Xin, KANG Zhongjian, CHANG Zheng, et al. Research of VSG based on ESO and terminal sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 65-72.
- [25] ANNAMRAJU A, NANDIRAJU S. Robust frequency control in a renewable penetrated power system: an adaptive fractional order-fuzzy approach[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 181-195. DOI: 10.1186/s41601-019-0130-8.
- [26] 康忠健, 孟繁玉. 基于扩张状态观测器的 SVC 非线性变结构控制[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(22): 10-13.
KANG Zhongjian, MENG Fanyu. Nonlinear variable structure SVC control based on extended-states-observer[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(22): 10-13.
- [27] 孙景涛, 李海平, 谢家安, 等. 一种基于非线性鲁棒 H_{∞} 方法的半直驱风电机组有功功率控制方法[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 104-111.
SUN Jingtao, LI Haiping, XIE Jia'an, et al. An active power control method for semi-direct-driven wind turbine generators based on non-linear robust H_{∞} method[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 104-111.
- [28] 丁小叶. 变频空调参与需求响应的调控策略与效果评估[D]. 南京: 东南大学, 2016.
DING Xiaoye. Regulating strategy and effect evaluation of inverter air-conditioner applied in demand response[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

收稿日期: 2019-08-12; 修回日期: 2019-10-09

作者简介:

康忠健(1971—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: kangzjzh@163.com

李锴绩(1996—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: 1580157286@qq.com

(编辑 葛艳娜)