

空调负荷虚拟同步机的负荷响应控制技术

季昆玉¹, 贾俊¹, 蒋中军¹, 朱庆², 杨永标³

(1. 国网江苏省电力有限公司 泰州供电分公司, 江苏 泰州 225306;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106; 3. 东南大学, 南京 210096)

Load response control of air conditioner virtual synchronous machine

Ji Kunyu¹, Jia Jun¹, Jiang Zhongjun¹, Zhu Qing², Yang Yongbiao²

(1. Taizhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou 225306, China;

2. Nari Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:空调负荷已经成为我国夏季用电的主要负荷之一,对电力系统的稳定运行产生了极大的威胁。负荷虚拟同步机技术可以感知电网的运行状态,在需求侧参与电网的一次调频,起到稳定电网的作用。首先,阐述了将变频空调作为负荷虚拟同步机运行,并参与电网一次调频的机理。其次,提出了空调负荷虚拟同步机负荷响应的调节策略及其功率控制方法。最后,通过仿真验证了所提出的负荷响应调节策略及其控制方法的有效性。

关键词:负荷虚拟同步机;负荷响应;空调功率控制;一次调频;变频空调

Abstract: The load of air conditioner has become one of the main loads during summer in China, which becomes a big threat to the stable operation of power system. The load virtual synchronous technology can sense the state of the grid, and participate in primary frequency control of state grid to stabilize the grid on the demand side. Firstly, the mechanism of participating in power system primary frequency control with variable-frequency air conditioner controlled by virtual synchronous machine technology is illustrated. Then, load response regulation strategy and control methods of the air conditioner virtual synchronous machine are proposed. Lastly, the effectiveness of load response regulation strategy and control methods of the air conditioner virtual synchronous machine are confirmed by simulation.

Key words: load virtual synchronous machine; load response; power control of air conditioner; primary frequency control; variable-frequency air conditioner

中图分类号: TM714; TK018 文献标志码: A

0 引言

虚拟同步机技术是利用电力电子变换器模拟同步发电机组机电暂态特性的控制技术,允许将接入电网的电力电子发电设备等等效成同步发电机组来分析,从而增强了电力系统的稳定性和故障恢复能力,简化了电力系统的分析方法。

文献[1]对虚拟同步机的概念、控制方法、应用及面临的挑战做了详细的阐述,目前的虚拟同步机技术的研究与应用主要集中在发电领域,特别是太阳能、风力发电并网等应用场合。文献[2]研究了虚拟同步机孤岛运行时的频率控制问题,消除了孤岛运行模式下的频率偏移。文献[3]—文献[4]研究了并网逆变器的虚拟同步机控制技术,通过不同的控制方法调节有功和无功,模拟同步发电机组的电磁暂态过程。针对需求侧的负荷虚拟同步机技术,目前的研究和应用仍然较少,因负荷一般属于用户,负

荷侧的虚拟同步机技术涉及产权归属不清、运营策略不清等问题,制约了负荷虚拟同步机技术的发展。目前负荷虚拟同步机中研究较多的领域是电动汽车充电桩控制等场合^[5],该场合由于产权清晰,可以尝试不同的运营策略。

空调负荷已成为我国夏季的最大负荷,基本不参与电网的频率调整,可以视为恒功率负荷,不利于电网的稳定。如果这部分负荷能够按照虚拟同步机的方式运行,在需求侧参与电网的一次频率调整,将有利于提高电网的稳定性^[6]。本文阐述空调负荷虚拟同步机在需求侧参与一次调频的限制与工作机理,提出空调类负荷虚拟同步机的有功调节策略和功率控制方法,通过仿真验证其所提出的有功调节策略及功率控制方法的正确性,为空调类负荷虚拟同步机的进一步研究及政策制定提供参考。

1 负荷虚拟同步机调频机理

电力系统一次频率调整主要依靠发电机有功静态频率特性的负斜率与负荷有功静态频率特性的正斜率实现系统的稳定,如图1所示。

收稿日期:2019-06-19;修回日期:2019-08-22

基金项目:国家电网公司科技项目(PD71-17-008)

This work is supported by Technical and Technology Program of State Grid (No. PD71-17-008)

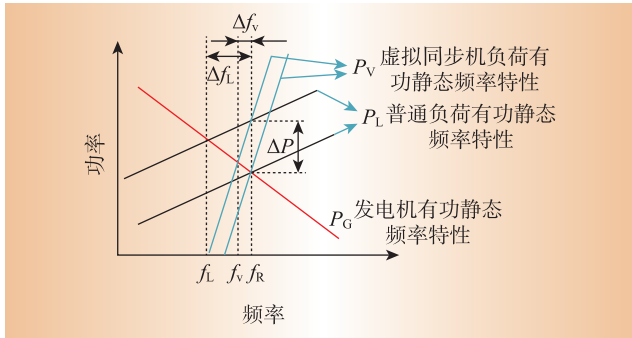


图1 电力系统一次频率调整

Fig. 1 Primary frequency control of power system

由于电力系统的频率变化范围一般较小,因此负荷静态有功特性的斜率一般也较小。当系统负荷增加 ΔP 后,系统频率从 f_R 移至 f_L ,其变化范围较大。采用虚拟同步机技术控制的负荷,可以提高负荷有功静特性的斜率,当系统负荷增加了 ΔP 后,系统频率从 f_R 移至 f_v ,频率变化范围较小,增加了系统的频率稳定性。

同步发电机的转子运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m + K_d(\omega_n - \omega) - T_e \quad (1)$$

式中: J 为发电机转子的转动惯量; ω 为转子角速度; T_m 为额定机械转矩; K_d 为阻尼系数; ω_n 为额定角速度; T_e 为负荷产生的电磁转矩; $T_m + K_d(\omega_n - \omega) = T_{mr}$ 为发电机的实际输入转矩。当负荷增加时, T_e 增加,发电机运行角频率下降,直至 $T_{mr} = T_e$,系统进入新的稳态,完成了系统的一次频率调整;当发电机输出功率接近其装机容量时,发电机的输入转矩将达到极限值,如果此极限值小于负荷产生的电磁转矩,即 $T_{mr} = T_{mr \max} < T_e$,发电机组将持续减速,系统将失去稳定,直至负荷下降或者多余的负荷被切除。

如果有一部分负荷能够以虚拟同步机的方式运行,其有功静特性变为

$$T_{ev} = T_{er} - K_v(\omega_n - \omega) \quad (2)$$

式中: T_{ev} 为负荷在发电机上产生的电磁转矩; T_{er} 为负荷的额定功率在发电机上产生的电磁转矩; K_v 为阻尼系数。如果负荷产生的电磁转矩 T_e 分为按虚拟同步机技术控制的负荷转矩 T_{ev} 和不按虚拟同步机技术控制的普通负荷转矩 T_{en} ,则同步发电机的转子运动方程为

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= T_m + K_d(\omega_n - \omega) - T_{en} - T_{ev} = \\ T_m + K_d(\omega_n - \omega) + K_v(\omega_n - \omega) - T_{en} - T_{er} &= \\ T_m + (K_v + K_d)(\omega_n - \omega) - T_{en} - T_{er} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可知,使用虚拟同步机技术运行的负荷,在系统发电量储备不足的情况下,相当于增加了系统的发电量;在系统发电量储备充足的情况下,相当于提高了发电机转子运动方程的阻尼系数,从而提高了电力系统的稳定性。

2 空调负荷虚拟同步机负荷响应调节策略

空调的主要耗电部件为位于空调外机的压缩机。图2为普通变频空调外机结构示意图。

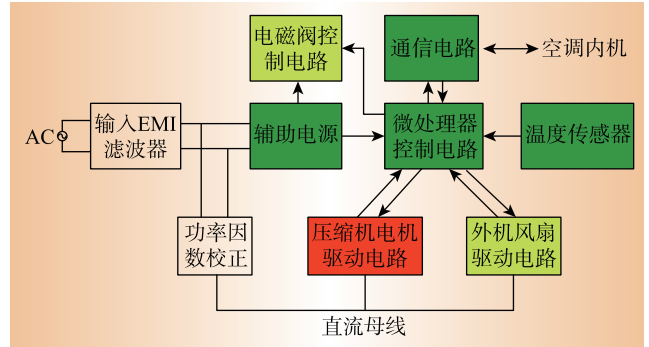


图2 普通变频空调结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of variable frequency air conditioner

为了减少谐波和无功,变频空调需要配功率因数校正(PFC)电路,在将交流电转换成直流电的同时,消除输入的无功,减少电流谐波。压缩机电机的驱动电路根据控制电路的指令,驱动压缩机电机旋转。因此,空调类负荷使用虚拟同步机技术运行时,无功始终为零,只有有功可以调节。

空调类负荷使用虚拟同步机技术面临的另一个问题是,空调本身属于用户,需要接收用户的指令改变运行状态,同时需要按照虚拟同步机的控制策略运行,二者本身就是一对矛盾。针对这对矛盾,本文提出了将空调允许的最大功率按照虚拟同步机原则运行的调节策略。

如图3所示,当系统频率位于额定频率之上时,说明此时系统供电充足,此时的空调最大允许功率为其额定功率。如果系统频率有所下降,说明系统供电不足,则使空调的最大允许功率按式(2)所示的虚拟同步机的有功静态频率特性运行。在这种情况下,如果空调当前的运行功率小于此时的最大允许功率,则该空调不受影响;如果空调当前的运行功率超过此时的最大允许功率,则该空调的制冷效果会

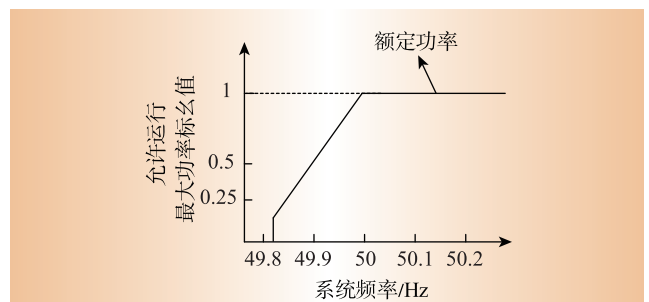


图3 空调负荷虚拟同步机功率调节策略

Fig. 3 Power control strategy of air conditioner load virtual synchronous machine

受到影响。如果电力系统频率进一步下降,说明电网发生了严重的故障,此时需要停机切负荷,以帮助电力系统快速恢复。

综上所述,空调类负荷虚拟同步机的功率调节策略可定义为

$$P_{\max} = \begin{cases} P_r & \omega > \omega_n \\ P_r - K_v \omega (\omega_n - \omega) & \omega_{fl} < \omega < \omega_n \\ 0 & \omega < \omega_{fl} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{\max}$ 为空调允许的最大运行功率; P_r 为空调的额定功率。如果系统频率低于 ω_{fl} , 则认为系统发生严重故障。

3 空调负荷虚拟同步机功率控制方法

如果忽略电力电子变换器的损耗和空调上电子器件的电消耗,空调负荷从电网吸收的有功可近似等于空调压缩机电机的有功功率。空调压缩机电机一般由电压源型三相桥式逆变器驱动,其控制框图如图4所示。

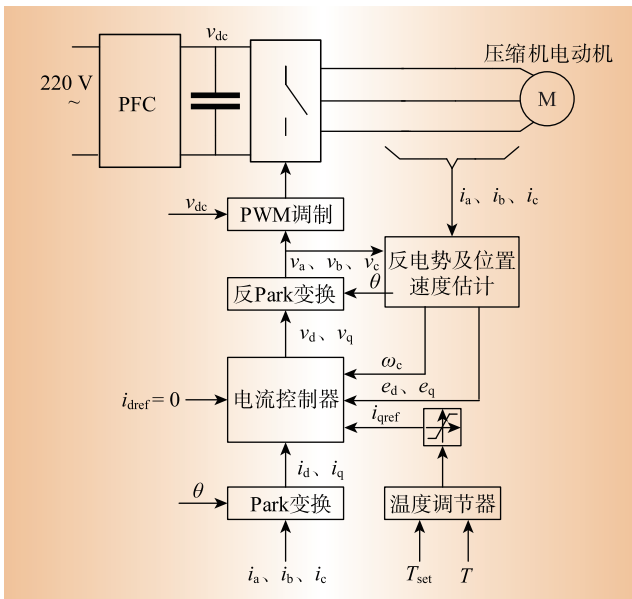


图4 空调压缩机电机控制框图

Fig. 4 Control diagram of air conditioner compressor motor

交流电经过PFC电路后变为稳定的直流电。为节省成本,空调压缩机一般采用表贴式永磁电动机,且多采用无位置传感器控制方法。

表贴式永磁电机的功率方程为

$$P_{me} = \frac{3}{2} \omega_c P_p L i_q^2 = \frac{3}{2} \omega_c P_p \Psi_m i_q \quad (5)$$

式中: P_{me} 为电动机输出的电磁功率; P_p 为极对数; L 为电动机定子dq坐标系下的电感。在电动机已经确定的情况下,压缩机电机的功率 P_{me} 由q轴电流 i_q 及电动机转速 ω_c 共同决定。因此,只要根据电动机转速 ω_c , 限制q轴的参考电流 i_{qref} 的最大值 $i_{qref,max}$, 就可以达到限制空调最大运行功率的目的,

从而起到虚拟同步机的控制效果。

综上所述,q轴的参考电流 i_{qref} 的最大值 $i_{qref,max}$ 的调节策略为

$$i_{qref,max} = \min(i_{qr}, \sqrt{\frac{2P_{\max}}{3\omega_c P_p L}}) \quad (6)$$

式中: i_{qr} 为q轴电流的额定值。因此,只需要调节q轴电流的最大值,就可以使变频空调按照虚拟同步机的方式运行。除了需要测量电力系统运行频率外,不需要改变任何其他硬件结构。

4 仿真验证

为了验证所提出的空调负荷虚拟同步机控制策略的有效性,使用MATLAB/Simulink建立了一个10 kVA的微网模型,如图5所示。

为测试空调负荷虚拟同步机在需求侧参与电网一次调频的效果,在 $t = 5$ s时,接入5 kVA的阻感负荷。图6为是否启用空调负荷虚拟同步机2种情况下系统的频率响应。不启用空调虚拟同步机时的电网频率下降幅度大于启用空调虚拟同步机时,说明空调虚拟同步机在需求侧参与了电网的一次调频,起到了稳定电网的作用。

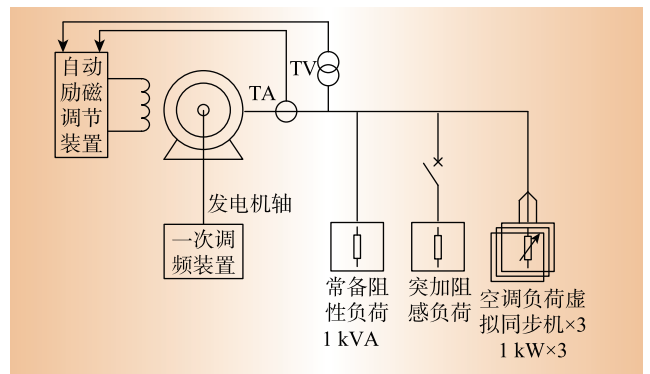


图5 10 kVA微网仿真模型

Fig. 5 10 kVA micro grid simulation model

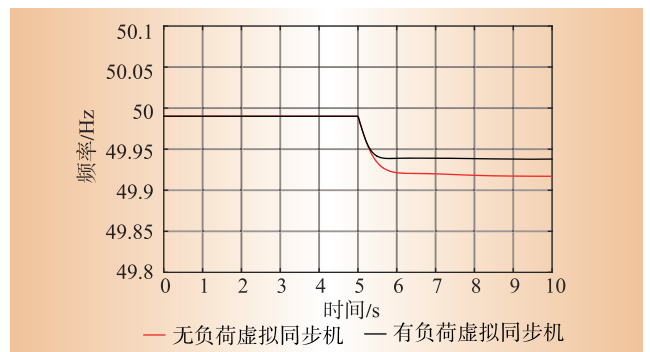


图6 $t = 5$ s时,接入5 kVA阻感负荷后,系统的频率响应

Fig. 6 Frequency response of the micro grid system after 5 kVA load get connected in

图7为每台空调压缩机电机最大功率限制 $P_{\max}$ 、压缩机电机实际运行功率 P_{me} 及压缩机转速

N_c 在 $t=4.8\text{ s}$ 至 $t=6.8\text{ s}$ 内的变化曲线。由图7可以看出,当系统正常运行时, $P_{\max}$ 大于 P_{me} , 负荷虚拟同步机控制策略不会对空调的正常运行产生影响。但是,当系统负载增大,系统运行频率下降时, $P_{\max}$ 也会下降,从而降低压缩机的转速和空调的功耗,维持系统的稳定运行。图7中 $P_{\max}$ 下降且小于压缩机给定的运行功率时, P_{me} 能够很好地跟随 $P_{\max}$, 说明了所提出的调节策略具有良好的跟随性。

为测试电网过载时,空调负荷虚拟同步机在需求侧参与稳定电网的效果,在 $t=5\text{ s}$ 时,接入 8 kVA 的阻感负荷。此时,微网的总负荷为 12 kVA , 大于其额定功率 10 kVA 。

图8为是否启用空调负荷虚拟同步机2种情况下系统的频率响应。如图8所示,如果不启用空调虚拟同步机,系统将处于过载状态,原动机输出转矩不足,系统频率持续下降。如果启用空调负荷虚拟同步机,则可以使系统持续稳定运行。当系统频率降低至 49.91 Hz , 仍然处于安全运行所允许的范围之内。

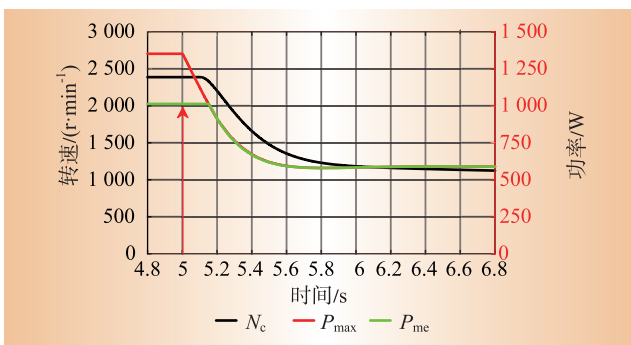


图7 $t=5\text{ s}$ 时,接入 5 kVA 阻感负荷后,每台空调压缩机 $P_{\max}$ 、 P_{me} 及 N_c 响应

Fig. 7 The response of $P_{\max}$, P_{me} and N_c of each air conditioner compressor motor after 5 kVA load get connected in

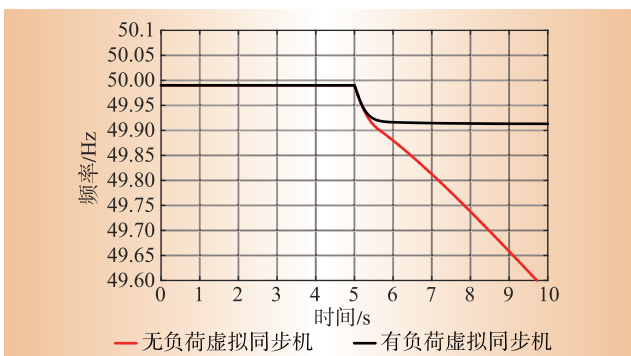


图8 $t=5\text{ s}$ 时,接入 8 kVA 阻感负荷后,系统的频率响应

Fig. 8 Frequency response of the micro grid system after 8 kVA load get connected in

图9为每台空调压缩机电动机最大功率限制 $P_{\max}$ 、压缩机电动机实际运行功率 P_{me} 及压缩机转速 ω_c 在 $t=4.8\text{ s}$ 至 $t=6.8\text{ s}$ 内的变化曲线。由图9中可以看出,当系统正常运行时, $P_{\max}$ 大于 P_{me} , 负荷虚拟

同步机控制策略不会对空调的正常运行产生影响。但是,当系统由于负载过大,系统运行频率下降时, $P_{\max}$ 也会下降,且比图7下降得更多,从而进一步降低压缩机的转速和空调的功耗,维持电网的稳定运行。

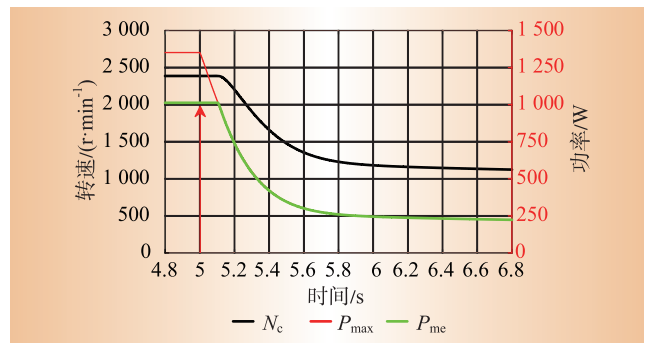


图9 $t=5\text{ s}$ 时,接入 8 kVA 阻感负荷后,每台空调压缩机 $P_{\max}$ 、 P_{me} 及 N_c 响应

Fig. 9 The response of $P_{\max}$, P_{me} and N_c of each air conditioner compressor motor after 8 kVA load get connected in

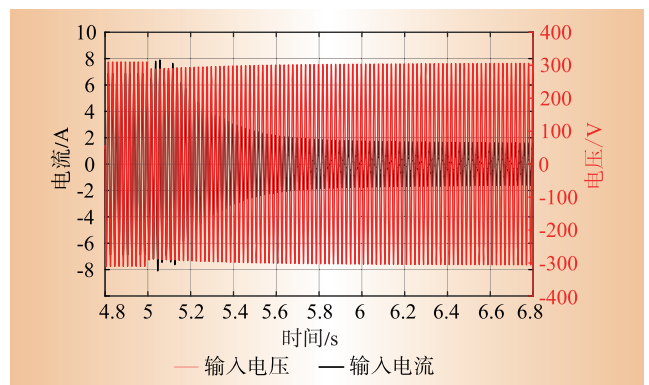


图10 空调输入电压及输入电流响应

Fig. 10 The response of input voltage and current of each air conditioner

图10为 t 在 4.8 s 至 6.8 s 之间的空调输入单相电流和单相电压的变化曲线。由图10可以看出,在 $t=5\text{ s}$ 时,由于阻感负荷的接入,系统电压有所下降,然后自动励磁调节装置使系统电压慢慢恢复。根据电压的变化和压缩机功率的变化,输入电流也产生相应的变化,从而完成输入功率的调节,维持系统的稳定性。

5 结束语

本文阐述了空调作为负荷虚拟同步机运行,并在需求侧参与电网一次调频的机理。提出了一种空调负荷虚拟同步机负荷响应的调节策略及其功率控制方法,使得需求侧的变频空调可以参与电网的一次调频,提高了电力系统运行的稳定性。最后通过仿真验证了本文的负荷影响调节策略及其功率控制方法,在需求侧参与电网一次调频并稳定电网方面的有效性。D

(下转第69页)