

变频空调负荷虚拟同步机化改造及其参与微网互动调控

徐青山,王 栋,戴蔚莺,张凯恒

(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要:为了提高微网系统运行的安全稳定性,充分发掘海量空调负荷资源的可调潜力,从而增强负荷响应自主性,在对空调压缩机电机控制电路改造的基础上,提出了一种变频空调负荷虚拟同步机群参与微网调频的控制方法。首先对变频空调压缩机电机进行负荷虚拟同步机控制改造,建立其控制模型;然后将空调压缩机电机进行聚合等值,便于其参与微网互动调控;接着建立了变频空调负荷虚拟同步机群参与微网互动的控制架构;最后提出变频空调负荷参与微网一次和二次调频的策略,并通过对变频空调负荷虚拟同步机群控制仿真,验证了负荷虚拟同步机化改造能够有效提升空调负荷参与调频的能力。

关键词:空调;改造;负荷虚拟同步机;控制架构;调频

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202002017

0 引言

随着分布式光伏发电、风力发电等新能源发电渗透率的不断提高,大量电力电子型电网接入设备所体现出的低惯量、欠阻尼问题给电力系统的稳定安全运行带来了巨大挑战。另一方面,逐年攀升的空调负荷已经占据大城市夏季高峰负荷的30%~40%^[1],并持续恶化着电力系统的负荷特性。为此,大量源-网-荷互动参与系统调峰调频及备用服务的项目如火如荼地开展^[2],其中,针对电力电子换流器的虚拟同步机(VSM)控制技术已经受到专家学者的广泛关注^[3-4],而开展负荷VSM的研究对于提高负荷群电网互动参与率、负荷群自主响应微网需求的能力以及增强电力系统安全稳定性具有重要的现实意义。

逆变器的下垂控制在一定程度上为微网系统提供了电压和频率支撑,但它只是对同步发电机下垂特性的近似,无法真正模拟同步发电机的运行特性^[5]。为了降低逆变器对微网稳定性的负面影响,文献[6]提出了基于同步发电机机电暂态模型的VSM技术,使VSM具备了功率控制和调频调压的双重功能。文献[7]提出的Synchronverter方案虽然较好地模拟了同步发电机并网及孤岛运行时的特性,但可能会引入同步发电机次同步振荡等固有缺陷。文献[8-9]提出的VSM方案在模拟同步发电机下垂控制、转动惯量和阻尼转矩的基础上,采用了电压双环控制增强VSM的运行特性。文献[10-11]利用定

转子方程来建立VSM模型,体现了同步发电机的动静特性。为了将VSM技术更好地应用到工程实践中,文献[12]提出一种基于VSM的电动汽车快速充电方案,减小了充电桩并网造成的电流畸变。文献[13]考虑不同电池储能的技术特征,从而精确地调度储能以满足电网调频需要,并实现荷电状态的均衡控制。文献[14-15]提出的虚拟同步发电机(VSG)方案可以实现并网运行恒功率控制,但不能孤岛并联运行,系统稳定性较差。文献[16]研究了微网储能单元基于VSG的充放电优化控制策略,给出了储能单元容量的选择方法。

现阶段,调动丰富的负荷资源参与系统互动已经成为相关领域研究热点。其中,变频空调凭借其资源丰富性、分布广泛性、峰谷同时性、负荷可调性和调温热惯性等优势,展现出巨大的负荷响应和调度潜力。传统空调负荷调控采用启停控制^[17-18]或调温控制^[19],在一定程度上挖掘了空调负荷的调控潜力,但对用户舒适度影响较大或在调控精准性上欠佳。

本文在对空调压缩机控制电路改造的基础上建立了变频空调负荷VSM的调控模型。针对空调压缩机控制电路进行负荷VSM建模,采用基于同调性的电动机动态聚合方法进行空调压缩机电机负荷聚合,提出空调负荷VSM群的互动模型,在MATLAB/Simulink平台上对变频空调负荷VSM群在微网中参与调控的算例进行仿真分析并验证了模型的有效性。

1 变频空调负荷VSM建模及改造

1.1 空调基本工作原理

空调的主要工作原理如图1所示。空调压缩机将制冷系统内制冷剂的低压蒸汽压缩为高压蒸汽后排至冷凝器,冷凝器通过室外风机带走热量,使制冷系统内的高压蒸汽凝结为高压液体。高压液体进入

收稿日期:2019-06-10;修回日期:2019-12-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901100);国家自然科学基金资助项目(51577028)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFB0901100) and the National Natural Science Foundation of China(51577028)

蒸发器在低压下蒸发,吸取周围的热量。室内风机使热空气不断进入蒸发器进行热交换,并将放热后变冷的空气送回室内。如此室内空气不断循环流动,冷热交换,达到降低温度的目的。

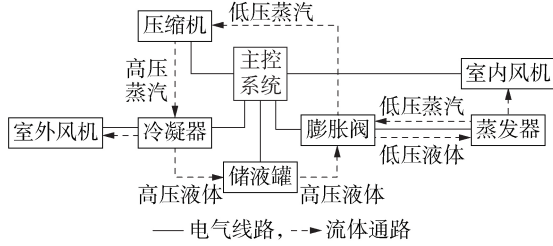


图1 空调的基本工作原理

Fig.1 Basic working principle of air conditioning system

变频空调在定频空调的基础上增加了压缩机电机变频控制模块,使得压缩机转速连续可调,温度变化更平滑,用户舒适度得到提高,因此目前变频空调在空调市场中的占比已经过半。而在空调系统中,压缩机耗能又占据系统总耗能的80%~87%,因此,本文将变频压缩机电机及其控制模块作为变频空调负荷的主要研究对象。

传统变频空调压缩机控制的主电路拓扑结构如图2所示,主要包括全桥整流电路和三相可控逆变电路。图中, u_a 、 u_b 、 u_c 为电源相电压; L_s 为电源电感; v_a 、 v_b 、 v_c 为逆变后的电源相电压; U 、 V 、 W 为压缩机电机三相端口; n_s 为转速。逆变器控制同时也是压缩机转速的调速控制环节,逆变器对压缩机转速的控制使得变频空调输出制冷量大小可调,实现室温的精细化调节。

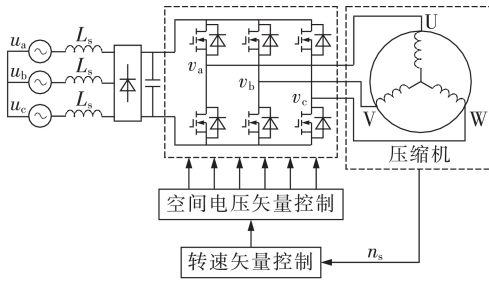


图2 传统变频空调压缩机控制主电路拓扑结构

Fig.2 Main circuit topology of traditional inverter air conditioning compressor control

1.2 负荷VSM建模

对变频空调压缩机控制进行变频空调负荷VSM控制需要对压缩机控制电路等空调系统环节进行改造,改造项目主要包括:①安装电网电压测量模块用于识别电网电压,空调主控系统根据电压瞬时值快速计算得到电网频率,将频率偏差作为空调参与电网调频自主响应的触发信号;②对整流模块进行VSM控制软硬件改造,将传统不可控整流电路改造

为桥式全控整流电路,并采用VSM控制进行调控;③给空调系统安装Wi-Fi或ZigBee等通信模块,使空调个体能够与其他空调或调控中心通信,提高空调负荷参与多样化电网互动的能力。改造后的空调系统架构简化图如图3所示。

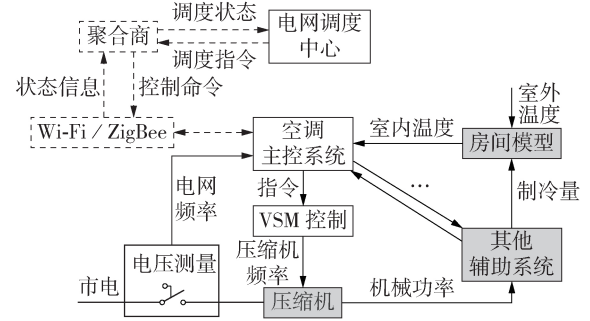


图3 改造后的变频空调系统架构

Fig.3 Architecture of transformed inverter air conditioning system

针对压缩机变频控制电路,对压缩机整流模块采用VSM控制技术,建立变频空调负荷VSM模型。假设VSM的极对数为1,那么结合同步机转子运动方程和功频下垂控制,可以得到变频空调负荷VSM的有功-频率控制方程为:

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{P_{ref} - P_{load}}{\omega} + K_f(f_s - f_{ref}) - D\Delta\omega \quad (1)$$

$$\Delta\omega = \omega - \omega_{ref} \quad (2)$$

$$\omega = d\theta/dt \quad (3)$$

其中, P_{ref} 为变频空调负荷VSM有功功率的参考值; P_{load} 为变频空调负荷VSM实际吸收的有功功率; f_s 为系统频率实际值; f_{ref} 为系统频率参考值(即50 Hz); K_f 为频率调差系数; J 和 D 分别为变频空调负荷VSM的转动惯量和阻尼系数; ω 为变频空调负荷VSM的角频率; ω_{ref} 为额定角频率; $\Delta\omega$ 为角频率偏差量; θ 为变频空调负荷VSM的电角度。

VSM模拟同步机励磁调节器无功-电压控制,结合电磁暂态关系,得到变频空调负荷VSM的无功-电压控制方程如下:

$$E = \omega M_f i_f = \omega M_f K_R d(E_0 - E + \Delta E_Q + \Delta E_U)/dt \quad (4)$$

$$\Delta E_Q = K_Q(Q_{ref} - Q_{load}) \quad (5)$$

$$\Delta E_U = K_U(U_{ref} - U_s) \quad (6)$$

其中, E 为无功-电压控制的输出电压; E_0 为VSM的空载电势; M_f 为定子和转子之间的虚拟互感幅值; i_f 为虚拟励磁电流; ΔE_Q 为无功-电压调节量; ΔE_U 为电压调节量; K_R 为励磁调节系数; K_Q 为无功调节系数; K_U 为电压调节系数; Q_{ref} 和 Q_{load} 分别为VSM无功设定参考值和实际无功负荷; U_{ref} 和 U_s 分别为系统电压参考值(有效值)和系统实际电压有效值。

进而得到VSM的电势电压矢量,即:

$$\mathbf{e}_{abc} = \begin{bmatrix} E \sin \theta \\ E \sin (\theta - 2\pi/3) \\ E \sin (\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

综合以上空调压缩机整流控制的VSM建模,将得到的虚拟电势矢量进行派克变换,通过电压电流双环控制,采用空间电压矢量控制(SVPWM)的方式驱动空调压缩机整流器工作,得到变频空调压缩机整流器VSM控制架构如图4所示。

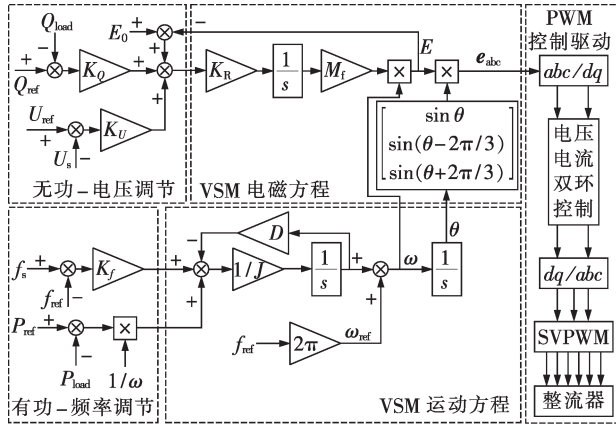


图4 变频压缩机整流器VSM控制架构

Fig.4 VSM control architecture of inverter compressor rectifier

变频空调压缩机整流器进行负荷VSM控制改造后,结合传统压缩机逆变器转速矢量控制可以得到改造后的变频空调压缩机主电路拓扑如图5所示。图中, P 、 Q 分别为输入有功和无功功率; U_{dc} 为整流后的直流电压。

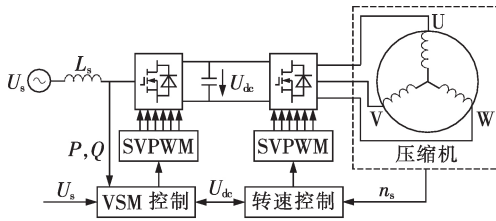


图5 VSM控制的空调主电路拓扑结构

Fig.5 Main circuit topology of air conditioning based on VSM control

2 变频空调负荷VSM群微网互动模型

实际的空调负荷具有分散性和差异性,研究空调负荷群的电网互动模型需要将大量的空调负荷聚合成变频空调负荷VSM群,以便于负荷聚合商/售电商对空调负荷进行有效的调度,从而准确及时响应微网调控需求。

2.1 变频空调负荷VSM群聚合

采用文献[20]提出的基于同调性的电动机动态聚合方法对变频空调压缩机负荷VSM群进行分组、等值和聚合,具体步骤如下。

(1)对空调压缩机电机进行聚合时,选取能够反映压缩机电机运行特性的主要参数作为特征向量。选择电机定子电抗 X_s 、转子电抗 X'_r 、互感 L_m 、转动惯量 J 和初始转差率 s_0 组成特征向量 $[X_s, X'_r, L_m, J, s_0]$,按照该特征向量进行压缩机负荷分组,忽略每组中电机转差的差异,即认为同组电机转速相同(即同调性)。

(2)采用模糊C均值聚类方法对参与聚合的压缩机电机进行分类。将 n 台电机分为 c 个类别,随机产生 c 个聚类中心,计算每台电机 k 的特征向量 $\mathbf{x}_k$ 与各个聚类中心 $\mathbf{w}_i$ 的距离平方 $(d_{ik})^2 = \|\mathbf{x}_k - \mathbf{w}_i\|^2$ 和隶属度 u_{ik} 。目标函数为:

$$\min O_j = \min \left[\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^j (d_{ik})^2 \right] = \sum_{k=1}^n \min \left[\sum_{i=1}^c (u_{ik})^j (d_{ik})^2 \right] \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1 \quad u_{ik} \in [0, 1] \quad (9)$$

其中, $j \in [0, 2]$ 为加权系数。通过迭代,不断更新隶属度和聚类中心直到目标函数变化量小于设定阈值或迭代次数达到设定次数。

(3)将聚类得到的电机按类别分组,组内各个电机暂态模型的同一个公式相加并除以组中电机总数得到聚合等值电机模型系数。根据诺顿定理,计算得到聚合等值电机的定转子阻抗等参数。

(4)对聚合得到的等值压缩机电机,采用空调负荷VSM控制,整定合适的控制参数,得到变频空调负荷VSM群聚合模型。

2.2 负荷VSM群互动架构

聚合商/售电商整合区域内的可空调负荷资源,采用2.1节提出的空调负荷分组聚合方法,将大量空调负荷资源聚合为不同类型或不同调控方式的定频空调负荷群、变频空调负荷群和变频空调负荷VSM群等,使得资源丰富而分布广泛的空调负荷可以有效响应微网调度中心调控指令,参与电网互动。其中,变频空调负荷VSM群除了能够参与传统空调负荷调控采用的直接负荷控制(DLC)进行电网削峰外,还能识别微网频率自响应电网频率偏差进行一次调频,以及接受主站指令调整负荷参与二次调频。

变频空调负荷VSM群参与微网互动的架构如图6所示,该架构主要由微网调度层、节点控制层和负荷响应层共3层构成。

(1)微网调度层主要包括微网调度中心。面对微网中可能出现的各种运行风险和故障,为了尽可能降低其出现的概率,调度中心建立各种风险运行或故障情况下的应对策略库。调度中心与空调负荷聚合商/售电商签订协议,在电网出现紧急情况时向后者发布指令,包括各聚合商/售电商负荷削减

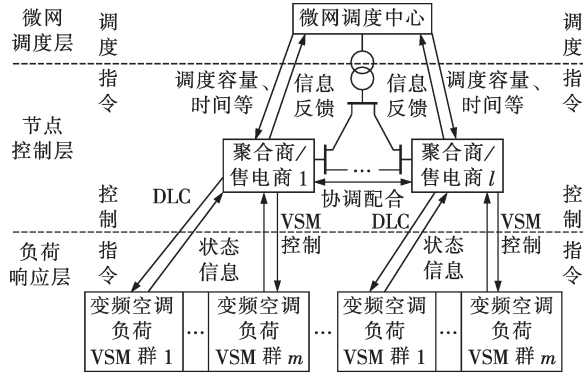


图6 变频空调负荷VSM群参与微网互动架构

Fig.6 Interactive architecture of inverter air conditioning load VSM cluster in microgrid

容量和削减时间。微网调度中心需要根据电网运行状况和各聚合商/售电商上报的实时可调负荷容量,协调分配不同聚合商/售电商的调度容量,及时发布指令并监测负荷响应情况和电网实时运行状态。

(2)节点控制层主要包括微网各个区域内的空调负荷聚合商/售电商。节点控制层根据和微网调度中心签订的协议以及微网实时调度指令,聚合区域内空调资源,上报可调容量和时长,将相应的控制指令下达到各个空调负荷终端,同时监测空调负荷运行状态。

(3)负荷响应层主要包括具有负荷调节能力并参与电网互动的空调设备。变频空调负荷VSM群在变频空调改造的基础上接收负荷聚合商/售电商的控制指令,响应电网调峰调频控制。

2.3 变频空调负荷VSM群互动策略

根据变频空调负荷VSM群参与微网互动的架构,空调负荷将被有效调控用于调频、调峰和功率支援。

2.3.1 参与一次调频

变频空调负荷VSM群通过式(1)中的空调负荷VSM有功-频率控制,自主响应电网频率偏差。微网频率跌落且低于一次调频下限时,空调负荷消耗功率减少并减缓频率跌落速度;频率上升且高于一次调频上限时,空调负荷消耗功率增加并减缓频率上升速度。类比VSG的功频静态特性曲线和有功负荷的功频静态特性曲线,得到空调负荷VSM参与一次调频的功频静态特性曲线如图7所示。当微网频率从 f_0 跌落到 f_1 时,变频空调负荷VSM群组的负荷从 P_{L0} 下降到 P_{L1} 。

2.3.2 参与二次调频

变频空调负荷VSM群参与一次调频属于有差调节,也可以接受指令参与二次调频,调度中心根据频率偏差量确定总的调度容量并分配到各空调负荷聚合商,聚合商将调度容量分配到各变频空调负荷VSM群组,通过设定影响后者调频特性的转动惯量

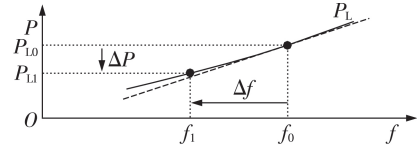


图7 变频空调负荷VSM群一次调频功频静态特性曲线

Fig.7 Power-frequency static characteristic curve of primary frequency regulation of inverter air conditioning load VSM cluster

J 和阻尼系数 D ,使其达到响应效果,由此变频空调负荷VSM群进行二次调频。图8为变频空调负荷VSM群二次调频图。

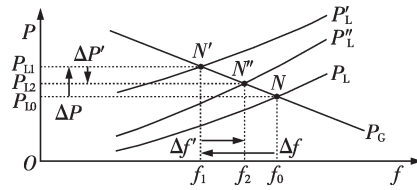


图8 变频空调负荷VSM群二次调频

Fig.8 Secondary frequency regulation of inverter air conditioning load VSM cluster

图8中, P_L 和 P_G 分别为系统工频运行时的负荷和发电机功频静态特性曲线,此时额定工作点为 N 。当系统中的负荷突然增加 ΔP 时,负荷的功频静态特性曲线上升到 P'_L ,工作点变为 N' ,系统频率降到 f_1 。此时变频空调负荷VSM群进行二次调频,设定合适的参数 J 、 D ,负荷功频曲线变为 P''_L ,变频空调负荷VSM群减少负荷 $\Delta P'$,频率上升到 f_2 。当可控空调负荷足够多时, P''_L 会和 P_G 重新相交于点 N ,使系统回到额定运行状态。

2.3.3 参与调峰或紧急功率支援

变频空调负荷VSM群可以通过设定输出功率的方式确定空调压缩机工作状态,实现空调负荷短时间内(不影响舒适度)在 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 范围内的自由调控,其中 $0 < P_{\min} < P_{\max}$ 。由此,变频空调负荷VSM群通过接收负荷聚合商/售电商的控制指令进行快速负荷调整,参与电网调峰或紧急功率支援。

综合以上分析的变频空调负荷VSM群参与电网一次调频、二次调频和调峰或紧急功率支援的互动策略,图9给出了变频空调负荷VSM群参与电网互动的流程图。负荷聚合商/售电商确定参与微网互动的空调负荷,评估其可调潜力,将个体空调聚合为空调负荷VSM群上报调度中心可调容量。然后接受调度指令,选择一次调频、二次调频或功率控制。按照对应控制策略向各台空调下发相应的控制指令,等待调度中心电网状态信息反馈。若互动未达到预期效果则重复上述步骤,反之则互动结束。调控完成后,分时逐批解除对空调负荷的控制,防止解除控制过程中产生新的大扰动。

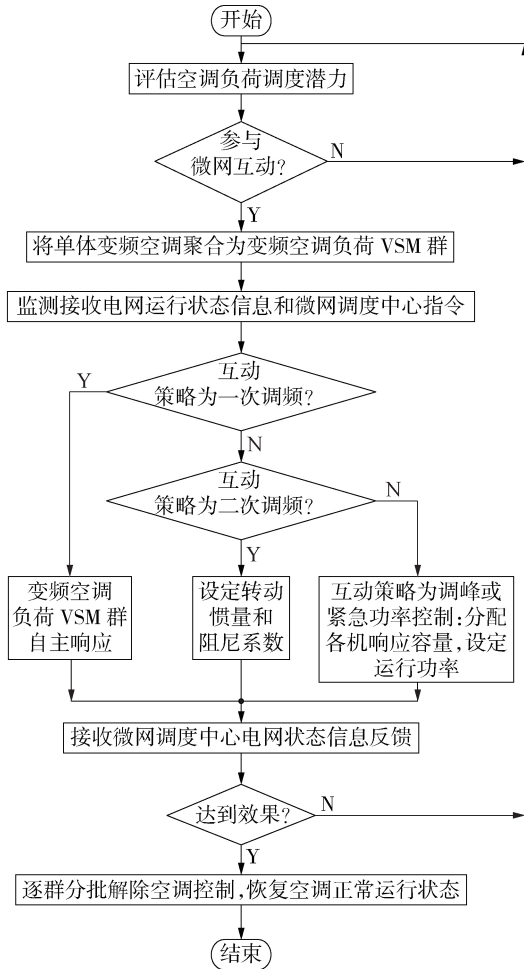


图9 变频空调负荷 VSM 群微网互动流程

Fig.9 Interaction process of inverter air conditioning load VSM cluster in microgrid

3 算例验证

建立变频空调负荷 VSM 群控制模型, 构建包含变频空调负荷 VSM 群在内的微网, 通过仿真验证分析其参与一次调频和二次调频的互动效果。

3.1 压缩机电机聚合

选择南京某写字楼里安装的 20 台变频空调作为聚合空调压缩机电机的样本参数来源, 查找手册并计算每台压缩机电机的特征向量。采用电机聚合方法将具有可调潜力的 20 台空调聚合为 2 台等值压缩机电机, 聚类得到的等值电机参数如表 1 所示。

表 1 空调压缩机聚类等值电机参数

Table 1 Parameters of air conditioning compressor clustering equivalent motor

空调编号	X_s / Ω	X'_r / Ω	L_m / H	$J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	s_0
1	$6.61 + j0.56$	$6.31 + j0.49$	0.52	0.017	0.005
2	$3.34 + j0.33$	$4.29 + j0.30$	0.31	0.014	0.001

根据聚合结果, 20 台空调被聚类分为 2 组: 第 1 组包含 15 台, 总功率为 37 kW; 第 2 组包含 5 台, 总功

率为 15 kW。

以 37 kW 等值电机为例, 对聚合后的压缩机等值电机进行变频空调负荷 VSM 控制, 对于 1 台等值电机包含的多台压缩机电机采用同一组控制参数。控制过程中涉及的重要参数如表 2 所示。

表 2 变频空调负荷 VSM 群控制系统重要参数

Table 2 Key parameters of inverter air conditioning load VSM cluster control system

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$f_{\text{ref}} / \text{Hz}$	50	K_0	0.01	M_f / H	0.08
$Q_{\text{ref}} / \text{var}$	0	K_U	0.5	$J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.5
$U_{\text{ref}} / \text{V}$	380	K_R	0.31	$D / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	15
E_0 / V	311	K_f	50000		

在 Simulink 中进行变频空调负荷 VSM 群控制仿真, 得到交流侧电流 i_{abc} 、直流侧电压 U_{dc} 、变频空调负荷 VSM 群输入功率 P_{load} 和电机转速 n_s 的波形如图 10 所示。

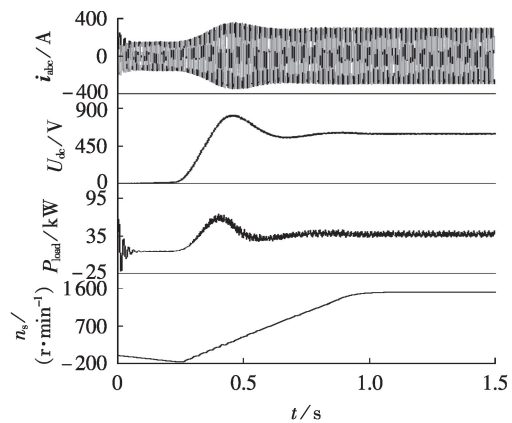


图 10 变频空调负荷 VSM 群仿真波形

Fig.10 Simulative waveforms of inverter air conditioning load VSM cluster

由图 10 可知, 变频空调负荷 VSM 群开始运行后, 电压、电流经过 1 s 左右的振荡和波动逐渐稳定在额定值附近; 等值空调压缩机电机在矢量控制下迅速达到额定转速 1500 r/min。

3.2 变频空调负荷 VSM 群一次调频

变频空调负荷 VSM 群根据 3.1 节的方法聚合得到等值电机, 仿真其参与电网一次调频的场景。图 11 中使用微网拓扑作为离网运行的简化微网拓扑, 包含参与一次调频的变频空调负荷 VSM 群、固定负荷和可变负荷。可变负荷波动使微网频率发生波动,

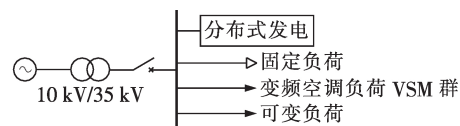


图 11 仿真用简化微网拓扑(离网运行)

Fig.11 Simplified microgrid topology for simulation(off-grid)

研究该过程中变频空调负荷VSM群的调控作用。

图12给出了变频空调负荷VSM群参与一次调频前后对微网频率变化的影响。虚线框①中,在0.5 s处可变负荷增大30 kW,若仅依靠微网自身进行一次调频,其频率跌落至49.93 Hz附近,变频空调负荷VSM群参与一次调频后,微网频率更快恢复,并且稳定在49.96 Hz;虚线框②中,在1.5 s处可变负荷增大35 kW,造成微网频率上升到50.01 Hz,变频空调负荷VSM群参与一次调频后,微网频率恢复到50.005 Hz。则变频空调负荷VSM群参与微网一次调频对促进频率快速恢复并维持在更安全范围内具备有利效果。

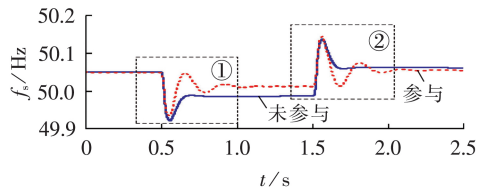


图12 变频空调负荷VSM群参与和不参与一次调频情况下微网频率变化曲线

Fig.12 Microgrid frequency curves with and without inverter air conditioning load VSM cluster participating in primary frequency regulation

3.3 变频空调负荷VSM群二次调频

变频空调负荷VSM群通过接收主站调控指令或根据工况自主修改VSM特征参数,参与二次调频。

仿真中仍使用图11中的微网拓扑。通过设定不同的 J 和 D ,仿真产生不同的二次调频效果,如图13和图14所示。图13为在 $D=15 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ 的情况下,调整 J 得到的不同调频曲线。可以明显地发现, J 越大,微网频率恢复过程波动的幅度越大,因此

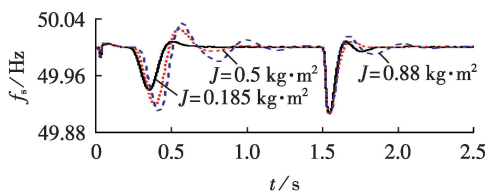


图13 变频空调负荷VSM群参与二次调频时微网频率变化

Fig.13 Microgrid frequency curves with inverter air conditioning load VSM cluster participating in secondary frequency regulation

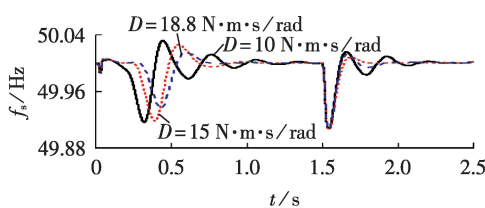


图14 变频空调负荷VSM群参与二次调频时微网频率变化

Fig.14 Microgrid frequency curves with inverter air conditioning load VSM cluster participating in secondary frequency regulation

恢复到额定运行频率的时间也就越长。

图14给出了变频空调负荷VSM群在 $J=0.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 的情况下,调整 D 得到的微网调频曲线。变频空调负荷VSM群 D 越大,微网受到干扰后频率的波动幅度和频次越小。另外, D 的增大将导致频率波动出现延时。

4 结论

本文基于负荷VSM控制技术,提出了一种变频空调负荷参与微网调频的控制方法,可以得出如下结论:

(1)不同于空调负荷以往参与的启停和调温控制,对压缩机电机进行的负荷VSM控制改造方法能够发挥空调负荷更丰富的调节潜力;

(2)面向海量变频空调负荷资源的压缩机等值电机聚合及其参与电网互动的架构,提高了空调负荷调控效率和负荷响应的准确度;

(3)基于负荷VSM技术,利用丰富的空调负荷资源参与微网调频,提高了微网运行稳定性,可以有效减少备用,降低电网建设投资。

基于本文的研究,今后将进一步开发并完善变频空调负荷VSM样机,研究根据实际情况确定不同变频空调负荷VSM群合适参数的方法。

参考文献:

- [1] 高赐威,梁甜甜,李扬. 自动需求响应的理论与实践综述[J]. 电网技术,2014,38(2):352-359.
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Yang. Theory and practice of automated demand response[J]. Power System Technology, 2014, 38(2):352-359.
- [2] 米增强,张文彦,贾雨龙. 柔性负荷虚拟电厂下冰蓄冷空调的优化控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):15-27.
MI Zengqiang, ZHANG Wenyan, JIA Yulong. Optimal control strategy of ice storage air conditioning under flexible load virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):15-27.
- [3] 郑天文,陈来军,陈天一,等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [4] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2591-2603.
- [5] ARANI M F M, MOHAMED Y A R I. Analysis and impacts of implementing droop control in DFIG-based wind turbines on micro-grid / weak-grid stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):385-396.
- [6] 丁明,杨向真,苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):89-93.
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93.

- [7] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [8] ZHANG Weiqiang, WU Zhenxing. Virtual synchronous generator design method based on stable voltage and frequency of the machine[C]//International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou, China: IEEE, 2016: 480-483.
- [9] TUMATI V K, VINU T, KUMARAVEL S, et al. Performance of virtual synchronous machine in autonomous mode of operation[C]//International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications. Al Ain, United Arab Emirates: IEEE, 2018: 310-314.
- [10] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters[C]//International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Santiago de Compostela, Spain: IISD, 2012: 734-736.
- [11] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Investigation of the virtual synchronous machine in the island mode[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe. Berlin, Germany: IEEE, 2012: 1-6.
- [12] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287-4294.
- LÜ Zhipeng, LIANG Ying, ZENG Zheng, et al. Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4287-4294.
- [13] 张圣祺, 袁蓓, 徐青山, 等. 规模化储能参与下的电网二次调频优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 89-95.
- ZHANG Shengqi, YUAN Bei, XU Qingshan, et al. Optimal control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 89-95.
- [14] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [15] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Reactive power control for load sharing with virtual synchronous generator control[C]//Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC). Harbin, China: IEEE, 2012: 846-853.
- [16] ALBU M, VISSCHER K, CREANGA D, et al. Storage selection for DG applications containing virtual synchronous generators[C]//PowerTech. Bucharest, Romania: IEEE, 2009: 1-6.
- [17] WEI Dechang, CHEN Nanming. Air conditioner direct load control by multipass dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 307-313.
- [18] YAO L, CHANG W C, YEN R L. An iterative deepening genetic algorithm for scheduling of direct load control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1414-1421.
- [19] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589.
- ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [20] 张剑, 孙元章, 徐箭, 等. 基于同调性的电动机动态聚合方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 48-52.
- ZHANG Jian, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. A dynamic aggregation method for induction motors based on their coherent characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 48-52.

作者简介:



徐青山

徐青山(1979—),男,江苏泰州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能配电系统与微网(E-mail: xuqingshan@seu.edu.cn);

王 栋(1995—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为柔性负荷调控;

戴蔚莺(1995—),女,江苏南京人,博士研究生,主要研究方向为智能电网调度与需求侧管理;

张凯恒(1995—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要研究方向为系统运行控制与优化。

(编辑 王欣竹)

Virtual synchronous machine transformation of inverter air conditioning load and its participation in microgrid interactive control

XU Qingshan, WANG Dong, DAI Weiying, ZHANG Kaiheng

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to improve the safety and stability of microgrid and fully explore the adjustable potential of mass air conditioning load resources, and enhance the autonomy of load response, a control method of the inverter air conditioning load virtual synchronous machine cluster participating in frequency regulation after transformation of compressor motor control circuit is proposed. Firstly, the inverter air conditioning compressor motor is modified for virtual synchronous machine controlling and the control model is established. Then, the inverter air conditioning compressor motors are aggregated to be an equivalent one, which facilitates the interactive regulation with the power grid. Afterwards, the control architecture of the inverter air conditioning load virtual synchronous machine cluster is established for participating in grid interaction. Finally, the strategy of inverter air conditioning load participating in primary and secondary frequency regulation of microgrid is proposed. The control simulation of the inverter air conditioning load virtual synchronous machine cluster is carried out, which verifies that the load virtual synchronous machine transformation can effectively improve the ability of air conditioners participating in frequency modulation.

Key words: air conditioner; transformation; load virtual synchronous machine; control architecture; frequency regulation