

空调负荷参与配电网电压管理的分布式控制方法

吴润基¹, 王冬骁^{1,2}, 谢昌鸿¹, 赖俊升^{1,3}, 黄佳畅¹, 赖来利¹

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东省广州市 510006; 2. 澳大利亚市场监管运营商, 墨尔本 3000, 澳大利亚;

3. 布鲁内尔大学电子与计算机工程系, 伦敦 UB8 3PH, 英国)

摘要: 配电网中空调负荷的规模随着生活水平的提高在快速增长,而带有空调的建筑具有热缓冲能力,使其具备了参与需求侧响应的价值。与此同时,分布式光伏发电在配电网中的渗透率也在逐步提高。光伏发电的波动对配电网电压稳定性造成了消极的影响。文中提出一种基于分布式趋同控制的方法,通过聚合商之间建立的有限通信链路对聚合空调负荷进行调度,以参与到配电网的电压管理中。其中,采用二维热工参数模型,从而更准确地计算带有空调的建筑热交换,使得用户的热舒适性需求得到保障。最后,基于改进的IEEE 15节点配电网算例分析验证所提控制策略的有效性和鲁棒性。

关键词: 空调负荷; 分布式控制; 电压管理; 分布式光伏发电; 有源配电网

0 引言

随着住宅侧温度调节需求的提高,配电网中空调负荷规模日益增加。据统计,在长三角等经济发达地区,空调负荷在高峰时段占比达到30%~40%,局部区域甚至超过50%^[1]。空调负荷的集中使用,会造成配电网中短暂而尖锐的电力需求高峰,导致电压明显下降,甚至越过下限值,电网公司被迫要对电力基础设施进行升级改造^[2]。与此同时,随着分布式可再生能源发电的逐步应用,如屋顶光伏,其并网会对配电网的潮流造成较大改变,对电压管理带来挑战,其间歇性对电能的稳定传输提出了更高要求^[3-4]。在太阳辐射值很高的时段,大量分布式光伏出力的集中提升将导致网络电压骤升,甚至超出上限值^[5-6]。

针对电压调节问题已有一些传统方法。电网侧调节方法有改变线路阻抗、调整变压器抽头、安装电压调节器等^[7]。考虑到光伏发电的不确定性,此类方法无法做到足够稳定可靠。用户侧调节方法有削减光伏发电、进行光伏无功补偿、配置能源存储系统等^[8-10]。但削减光伏发电显然不符合可再生能源发展方向。配电网R/X值较高,无功补偿难以达到较好效果^[4],而配置足够的能源储存系统所产生的成本,对普通用户依然是较大的负担。

随着需求侧响应技术的发展,通过对用户侧负

荷的控制来重塑需求状况成为可能^[1]。由于配置空调的房屋具备特殊的热缓冲能力,使得空调负荷在一定范围内可以调整和控制。相关运营商通过与用户签订合适的协议,可让用户的空调负荷参与到需求侧响应方案中。

此前,已有较多研究针对空调负荷的建模和控制。文献[11]将变频空调负荷建模为热电池,设计了分级控制框架使其加入电网调度中。文献[12-13]均基于一维热工模型对空调负荷进行建模。前者用于建筑光伏面积和电池储能系统容量的优化问题,后者提出模糊自适应帝国竞争算法进行求解。文献[14]基于空调-建筑系统一维等效参数模型及热感觉投票法建立虚拟储能系统,并提出多个评估指标进行性能分析。文献[15]基于二阶热路模型得到空调温差-功率特性并进行聚类分组,同时为空调负荷参与需求侧响应提出了聚合商的调度架构及博弈分层优化模型。文献[16]针对大规模公共楼宇中央空调系统进行建模并提出其参与电网调峰的组合同控模型。文献[17-18]提出空调负荷、光伏和电池储能系统的双层优化调度方案,从而减少网络用电峰值、提高光伏渗透率并最小化系统运行费用。

综上所述,较少有研究通过聚合和控制住宅侧的空调负荷群来进行低压配电网电压管理,特别是同时考虑低压配电网中光伏发电高渗透率的场景。本文采用一种更高精度的改进二维热工参数模型,保证了控制过程中用户的热舒适性要求。在此基础上,对空调负荷进行聚合,提出一种基于趋同算法的

分布式控制策略,从而利用聚合空调负荷群进行配电网电压管理。最后采用改进的IEEE 15节点配电网验证了所提方案的有效性。

1 空调负荷的建模和聚合

1.1 空调负荷的建模

本文所研究的空调负荷具体类型为分体式空调,且为定频空调。同时,本文设定空调用户在与聚合商签订合适的协议后加入需求侧响应方案中,此后空调的启停由聚合商控制(在此之前还需对空调进行必要的技术改进,该内容不在本文讨论范围内)。在用户将其所需温度范围上报聚合商后,聚合商在满足用户热舒适性需求的条件下进行控制,参与电压管理。因此,确保用户的热舒适性需求不受影响是空调负荷参与需求侧响应的重要前提,而空调负荷及建筑热交换过程的建模和描述至关重要。热工参数模型如图1所示。

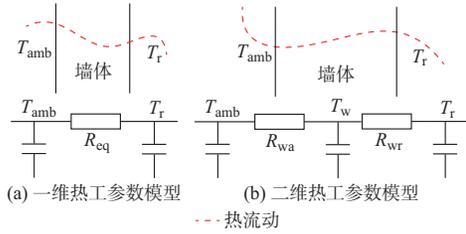


图1 热工参数模型
Fig. 1 Models of thermal parameters

图1(a)所示的一维热工参数模型是一种常用的简化模型,仅考虑建筑内部与外部环境的热交换,未对墙体进行详细建模,只考虑墙体的热阻而忽略其热容^[19]。根据文献[20-21],热模型的复杂性给制冷负荷计算带来了显著的影响。图1(b)是更精准的二维热工参数模型^[22],其考虑到墙体的热质量和热容,动态热过程描述如下:

$$\frac{dT_{r,t}}{dt} = \frac{1}{M_a C_{pa}} \left(\frac{dQ_{\text{gain},a,t}}{dt} - \frac{dQ_{\text{ex},w,r,t}}{dt} - \frac{dQ_{\text{ac},t}}{dt} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dT_{w,t}}{dt} = \frac{1}{M_w C_{pw}} \left(\frac{dQ_{\text{gain},w,t}}{dt} + \frac{dQ_{\text{ex},w,r,t}}{dt} \right) \quad (2)$$

式中: $T_{r,t}$ 为 t 时刻的室内空气温度; $T_{w,t}$ 为 t 时刻的房屋墙体的温度; C_{pa} 和 C_{pw} 分别为空气和墙体的热容量; $Q_{\text{gain},a,t}$ 为室外环境向室内空气传递的热量; $Q_{\text{gain},w,t}$ 为室外环境向房屋墙体传递的热量; $Q_{\text{ex},w,r,t}$ 为室内空气和墙壁内表面之间交换的热量; $Q_{\text{ac},t}$ 为空调的制冷量或制热量; M_a 和 M_w 分别为室内空气和墙体的质量。

式(1)表示室内空气温度变化速率,式(2)表示墙体温度变化速率。将系统一个完整的运行周期分为 N 个时间段,每个时间段即为一个时间步长,当时间步长足够小时,环境温度等变量在任何一个时间步长内可假定为恒定值。则式(1)和式(2)的热动态模型可被线性化表示为:

$$T_{r,t} = \left(1 - \frac{1}{M_a C_{pa} R_{\text{eq}}} \right) T_{r,t-1} + \frac{1}{M_a C_{pa} R_{\text{eq}}} T_{\text{amb},t-1} + \frac{T_{w,t-1} - T_{r,t-1}}{M_a C_{pa} R_{\text{wr}}} - S_{\text{ac},t} \frac{Q_{\text{ac},t-1}}{M_a C_{pa}} \quad \forall t \in [1, N] \quad (3)$$

$$T_{w,t} = T_{w,t-1} + \frac{T_{\text{amb},t-1} - T_{w,t-1}}{M_w C_{pw} R_{wa}} + \frac{T_{r,t-1} - T_{w,t-1}}{M_w C_{pw} R_{wr}} \quad \forall t \in [1, N] \quad (4)$$

式中: $T_{\text{amb},t}$ 为 t 时刻的室外环境温度; R_{eq} 为房屋墙体的等效热阻; R_{wr} 为房屋墙体内表面与房屋内部空气之间的等效热阻; R_{wa} 为房屋墙体外表面与外部环境空气之间的等效热阻; $S_{\text{ac},t}$ 为 t 时刻空调的开关状态。

用户的热舒适性需求可通过室内温度范围表示为:

$$T_r^{\min} \leq T_{r,t} \leq T_r^{\max} \quad \forall t \in [1, N] \quad (5)$$

式中: T_r^{\min} 和 T_r^{\max} 分别为室内空气温度的最小值和最大值。

建筑墙壁温度范围约束为:

$$T_w^{\min} \leq T_{w,t} \leq T_w^{\max} \quad \forall t \in [1, N] \quad (6)$$

式中: T_w^{\min} 和 T_w^{\max} 分别为建筑墙壁温度的最小值和最大值。

空调的工作状态由室内温度相对预设温度范围的情况决定:

$$S_{\text{ac},t} = \begin{cases} 0 & S_{\text{ac},t-1} = 1, T_{r,t} \leq T_r^{\min} \\ 1 & S_{\text{ac},t-1} = 0, T_{r,t} > T_r^{\max} \\ S_{\text{ac},t-1} & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

1.2 空调负荷的聚合

由于单个住宅用户的空调设备仅提供有限的可控负荷量,不能满足需求侧响应最小的负荷要求,则对空调负荷群进行有效聚合控制十分关键。在实际应用场景中,需要采用聚合商^[11,23]对空调群进行聚合控制。聚合商在参与电压管理过程中,需要实时更新其组内所有空调负荷总的可控有功功率,单个聚合商在某一时刻的最大可控有功功率为:

$$\max P_{i,t}^{\max} = \sum_{n=1}^{N_a} \frac{1}{\eta_n} (1 - S_{\text{ac},n,t}) P_{\text{rate},n} \quad (8)$$

式中: $P_{i,t}^{\max}$ 为聚合商*i*在*t*时刻可提供的最大可控有功功率,文中假设无功功率在空调侧完全补偿; N_a 为聚合商*i*所管理的空调数量; η_n 为空调*n*的性能系数; $S_{ac,n,t}$ 为空调*n*在*t*时刻的开关状态; $P_{rate,n}$ 为空调*n*的额定功率。

基于上述空调负荷建模方法,本文采用差分进化算法^[24]计算每个聚合商在各个时刻的最大可控有功功率,此算法所采用的时间间隔为1 min。同时,设置5个聚合商,每个聚合商管理150个不同规格的空调,不同的空调负荷所对应的理想室内温度在23~26℃之间随机选择。为模拟不同用户的热舒适范围,给不同的聚合商设定不同的温度调整范围,分别为±1.5,±2.0,±2.0,±2.5,±3.5,±4.5℃,即具有相同温度调整范围的空调负荷由同一聚合商负责聚合控制,但其可具有不同的理想温度,这保证了用户需求的差异性得到满足。

在保证用户热舒适性要求的前提下,可得到各聚合商的可控有功功率。为方便对比,附录A图A1为在每个聚合商中随机抽取理想温度为25℃的单个室内温度的变化情况,但其对应不同的温度调整范围。附录A图A2则展示了每个聚合商各个时间段的可控有功功率。聚合商可根据不同时刻的电压管理需求对空调负荷进行控制。可看出,室内温度可以保持在预设的范围内,说明用户的热舒适性需求得到了保证。结合附录A图A1和图A2可知,可调温度范围越大,聚合商可控有功功率越大。由于低压配电网的高R/X比,有功功率对电压的影响效果相对无功功率更加显著。为此,本文通过控制空调负荷的有功功率来调节低压配电网电压。需要指出的是,低压配电网中,部分接入单相网络的空调负荷在控制过程中,可能引起低压配电网的三相不平衡问题。本文侧重于对空调负荷建模聚合以及分布式控制策略的研究,故对此问题进行了简化。

2 电压管理的分布式控制体系

如前文所述,利用空调负荷进行配电网电压管理是针对用户侧进行的。作为一种本地化的问题,考虑到灵活性和鲁棒性的要求,分布式控制策略相比集中式控制策略更有优势^[6]。本文采用分布式趋同控制^[25]的方法来实现多聚合商的协同运行,从而参与到配电网的电压管理中。趋同控制的关键在于不同聚合商之间通过有限的信息交换进行协调。其通信网络拓扑结构可以建模为时变系数矩阵,以动态反映拓扑结构的变化和可能的链接失效。该通信矩阵为:

$$\varphi_t = \begin{bmatrix} \varphi_{11,t} & \varphi_{12,t} & \cdots & \varphi_{1m,t} \\ \varphi_{21,t} & \varphi_{22,t} & \cdots & \varphi_{2m,t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{m1,t} & \varphi_{m2,t} & \cdots & \varphi_{mm,t} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\varphi_{ij,t}$ 为第*i*个聚合商和第*j*个聚合商在*t*时刻之间的通信链路状态。如果在*t*时刻,聚合商*i*和*j*之间能相互通信,则 $\varphi_{ij,t}=1$,否则 $\varphi_{ij,t}=0$ 。特别地, $i=j$ 时, $\varphi_{ij,t}=1$ 。

在实际场景中,配电网中多个关键节点的电压信息可通过电压互感器等设备进行实时监测,并发送给聚合商,以对电压变化做出相应的动作。在正常运行情况下,各节点的电压可以保持在安全范围内,而当出现光伏发电出力较大提升或配电网用电高峰的情况,部分节点电压将有可能超越限制,此时 $V_{i,t} > V^{\max}$ 或 $V_{i,t} < V^{\min}$,则分布式控制策略启动。

$$\mu_{i,t} = \begin{cases} k_i(V_{i,t} - V^{\max}) & V_{i,t} > V^{\max} \\ k_i(V_{i,t} - V^{\min}) & V_{i,t} < V^{\min} \\ 0 & V^{\min} \leq V_{i,t} \leq V^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mu_{i,t}$ 为第*i*个聚合商有功功率调整的信息状态; $V_{i,t}$ 为节点*i*在*t*时刻的电压值; V^{\max} 和 V^{\min} 分别为网络节点电压的上、下限; k_i 为节点*i*的灵敏度系数。对一个具体的运行场景, k_i 可以根据实际情况通过计算和试错法来确定。

电压灵敏度因子可用于分析有功功率和无功功率对指定母线电压变化的影响^[26-27]。节点电压变化和功率变化之间的关系可通过雅可比矩阵得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: ΔP 和 ΔQ 分别为节点有功功率和无功功率; $\Delta |V|$ 为节点电压幅值; $\Delta \theta$ 为节点电压相角; J_1, J_2, J_3, J_4 为雅可比矩阵的向量; A 和 B 分别为节点电压相角的有功功率和无功功率灵敏度。

节点电压*V*的有功功率*P*和无功功率*Q*的灵敏度*C*和*D*分别为:

$$\begin{cases} C = \frac{\partial V}{\partial P} \\ D = \frac{\partial V}{\partial Q} \end{cases} \quad (13)$$

假定无功功率在空调侧全部被补偿,则灵敏度矩阵元素 $C_{r,ji}$ 被修正为:

$$C_{r,ji} = \begin{cases} C_{ji} & i \in N_j \cup \{j\} \\ 0 & i \notin N_j \cup \{j\} \end{cases} \quad (14)$$

式中： N_j 为与聚合商 j 有信息交流的聚合商集合。

转换矩阵元素 $\Psi_{ij,t}$ 为：

$$\Psi_{ij,t} = \frac{C_{r,ji}\varphi_{ij,t}}{\sum_{j=1}^n C_{r,ji}\varphi_{ji,t}} \quad (15)$$

每个聚合商可以根据本地节点电压和通信链路上相邻聚合商的信息状态来更新自己的信息状态：

$$\mu_{i,t} = \Psi_{ii,t}\mu_{i,t} + \sum_{j \in I_i} \Psi_{ij,t}\mu_{j,t} \quad (16)$$

式中： I_i 为子系统 i 可以交流到的子系统集合。根据1.2节所提聚合商中空调负荷群最大可控有功功率 $P_{i,t}^{\max}$ ，每个聚合商在 t 时刻的有功功率消耗为：

$$P_{i,t} = \mu_{i,t} P_{i,t}^{\max} \quad (17)$$

上述提出的分布式控制结构如附录B图B1所示。所提出的控制框架中，采用的时间间隔为1 min，即运算控制周期。在每个周期内，各聚合商通过输入和检测设备获取必要的信息，如温度设置、实时环境温度、室内温度和空调的运行状态等，进而与分布式控制器进行信息交换并受其控制。通过聚合商之间有限的信息交流，各类信息数据被及时更新，随后根据所需的有功功率消耗任务，对其聚合的空调负荷群执行操作。

3 案例分析和仿真结果

上述所提方案采用改进的IEEE 15节点配电网^[28]进行测试以验证其有效性，如图2所示。

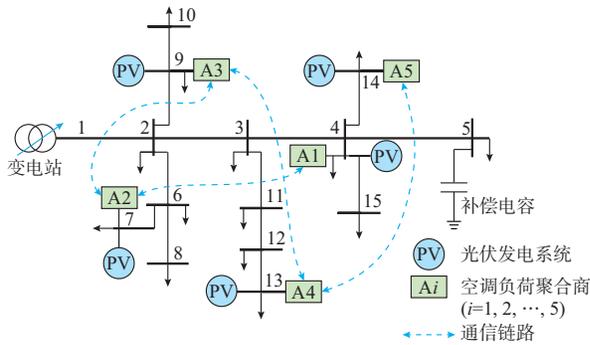


图2 IEEE 15节点配电网
Fig. 2 IEEE 15-bus distribution network

图2中，分布式光伏发电系统分别位于节点4，7，9，13和14，对应的额定发电功率为250，400，350，550和450 kW。5个聚合商与光伏发电系统配置在相同节点上，以达到较好的控制效果。其中，聚合商之间的通信链路也由图2给出。本文假定运营商与用户之间签订了必要的协议，通过一定的奖励计划，比如电价优惠、现金奖励等，鼓励他们参与需求侧管理项目。此处的配电网内用户侧电压等级为220 V

(1.0 p.u.)，网络节点电压上下限设置为1.05 p.u.和0.95 p.u.。本文涉及的气象数据来源于中国气象数据网^[29]，采用中国广东省广州市夏季某一日的的数据。负荷曲线为经典的住宅负荷曲线^[30]。光伏日发电曲线和日负荷曲线如图3所示。本文方案通过MATLAB软件配合MATPOWER组件进行仿真求解，仿真平台为联想笔记本电脑(CPU:AMD Ryzen 5, 3 550H, 四核, RAM 16 GB, 64位 Windows 10操作系统)。

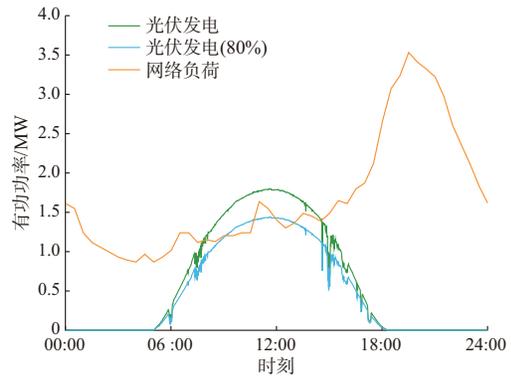


图3 日负荷曲线和日光伏发电曲线
Fig. 3 Curves of daily load and daily photovoltaic power generation

3.1 24 h运行控制仿真结果

通过计算机仿真，24 h运行的模拟结果如图4、图5和附录C图C1所示。仿真程序求解平均时间为10.38 s，对比控制方案设定的时间间隔1 min，可以满足要求。

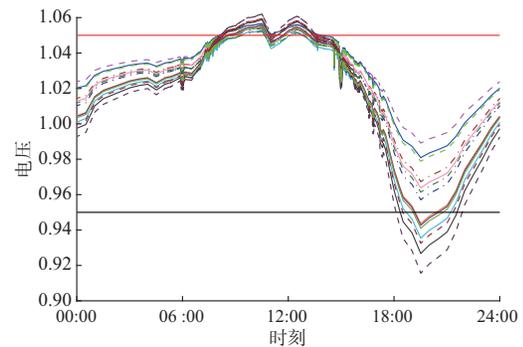


图4 未采用控制方案的电压曲线
Fig. 4 Voltage curves without adoption of control scheme

结合图3和图4可知，在08:00—14:00期间，由于光伏发电功率上升达到较高的水平（此处光伏发电功率采用如图3中绿色曲线），而用电需求未能充分消耗其发电量，网络各节点电压持续上升，大部分电压水平超过电压上限 V^{\max} ，导致出现过电压情况。

在 18:00—22:00 期间,光伏发电量基本降至 0 附近,而此时晚间用电高峰到来,网络电压持续下降,部分节点电压越过下限值 V^{\min} ,出现比较严重的欠电压情况。

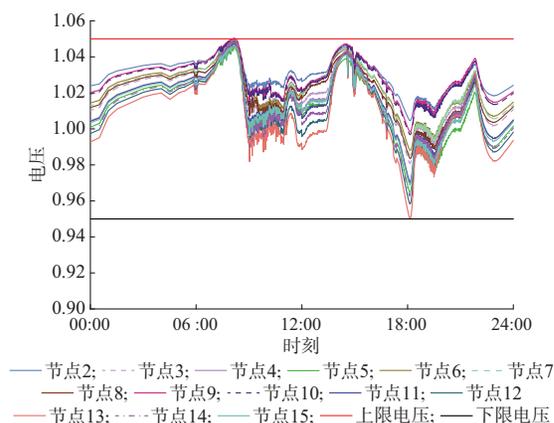


图5 采用控制方案的电压曲线
Fig. 5 Voltage curves with adoption of control scheme

采用本文所提方案后,网络电压的变化情况如图5所示。对应地,附录C图C1为在分布式趋同控制策略下,各聚合商根据配电网电压变化情况做出的反应,展示了各时间段各聚合商提供的有功功率支撑,即增加或减少空调负荷群的有功功率消耗。结合图4、图5和附录C图C1可以看出,08:00—14:00期间,当网络电压超过上限值时,各聚合商在分布式趋同控制策略下,按照算法计算的情况提高其各自空调负荷群的有功功率消耗量,使得电压水平保持在上限值之下。同样地,18:00—22:00期间,当网络电压越过下限值时,各聚合商减少有功功率消耗,使电压水平保持在下限值之上。于是,该配电网中各节点电压在一日中均维持在安全范围内,利用空调负荷参与配电网电压管理,达到了良好的效果。值得注意的是,此过程中,由于未将光伏进行削减,从而保证了光伏发电的高渗透率,与此同时,根据1.2节可知,基于较高精度的模型,使得空调负荷在接受控制的过程中,保证了各住宅用户的热舒适性需求。

3.2 不同光伏渗透率下的控制效果对比

在验证方案在低压配电网电压管理的有效性基础上,针对网络中不同的光伏渗透率水平场景进行仿真对比,即将光伏发电出力在原基础上按一定比例进行调整,其他条件维持不变,进行多次仿真实验,实验结果如表1和表2所示。其中,表1为不同光伏渗透率的条件下,采用控制方案前后,网络电压的最大值和最小值情况。可见,在不同场景下,由于夜间网络负荷较大,均发生了欠电压的情况,但调整

后的网络电压最小值均维持在允许范围内。同时可以看到,光伏渗透率相对较低,即光伏发电出力为20%,50%,70%时,网络未发生过电压越限的情况,故此段时间控制策略未动作。当光伏渗透率较高,即光伏发电出力为80%,90%,100%时,配电网出现过电压,且电压越限程度随渗透率提高而加重。在这些场景下,采用控制方案后的网络电压最大值均维持在正常范围内。其次,表2对比了未采用方案的网络电压最大值及采用后该最大值对应的同一时刻同一节点电压值,以及这两者之间对应的下降幅度。可以看出,随着光伏渗透率上升,电压越限加重,而本文控制策略对电压的调整幅度也随之加大。

表1 不同光伏渗透率下的电压控制效果
Table 1 Voltage control effects with different photovoltaic penetration rates

光伏发电出力 相对值/%	网络电压最大值		网络电压最小值	
	采用方案	不采用方案	采用方案	不采用方案
100	1.046 2	1.061 9	0.950 1	0.915 6
90	1.048 3	1.056 7	0.950 0	0.915 6
80	1.049 9	1.052 0	0.950 0	0.915 6
70	1.048 2	1.048 2	0.950 1	0.915 6
50	1.042 4	1.042 4	0.950 0	0.915 6
20	1.036 3	1.036 3	0.950 1	0.915 6

表2 电压调整幅度对比
Table 2 Comparison of voltage adjustment amplitudes

光伏发电出力 相对值/%	未采用方案的网 络电压最大值	采用方案后对应同一 时刻同一节点电压	调整幅 度/%
100	1.061 9	1.000 1	-5.8
90	1.056 7	1.005 1	-4.9
80	1.052 0	1.033 6	-1.7
70	1.048 2	1.048 2	0
50	1.042 4	1.042 4	0
20	1.036 3	1.036 3	0

同时还可从网络电压曲线对比看出控制方案的这种特点。附录C图C2至图C4展示了光伏发电出力80%的仿真结果。对比3.1节中的场景,针对过电压部分,由于光伏渗透率相对较小,过电压情况较轻,此时电压调整的幅度也有所减少,如附录C图C3所示。各聚合商所提供的有功功率消耗情况如附录C图C4所示,可见各聚合商的有功功率消耗量也根据需求的减少而调低。

3.3 不同通信链路拓扑状态下的控制效果对比

实际通信过程中可能存在链路失效情况,而趋同控制允许不同聚合商之间通过有限的信息交换进行协调,具备较好的灵活性和鲁棒性。因此,通过对

不同通信链路拓扑状态进行仿真并对控制效果进行对比分析,来进行验证。仿真结果如表3和附录C图C5至图C8所示,不同拓扑状态下的电压曲线有一定差异,但电压水平都能维持在正常范围内。由于算法收敛情况不同,计算速度有所不同。其中,网状形拓扑状态下的计算速度最快,但也需要较高链路要求。对应地,链形和星形下良好的控制效果也验证了环形和网状形控制方法的鲁棒性,因为在这2种情况下任意一条通信链路中断,系统都能正常工作,维持电压的正常水平。

表3 不同拓扑下的控制效果对比
Table 3 Comparison of control effects in different topologies

网络拓扑	示意图	计算时间/s	电压控制是否有效
链形		19.57	是
星形		15.21	是
环形		12.09	是
网状形		10.38	是

4 结语

本文基于改进的二维热工参数模型对空调负荷进行建模和聚合,既保证了用户热舒适性需求,又降低了空调负荷群控制的难度。在提出的分布式趋同控制框架下,聚合商通过有限的通信链路协调空调负荷群提供有功功率支撑。针对配电网中的高光伏渗透率导致的过电压和用电高峰导致的欠电压,都能有效消除。不同光伏渗透率下,控制策略能根据电压的偏离情况适应性调整,且在高光伏渗透率下能达到更好的控制效果。同时,在不同通信链路拓扑状态下,所提出控制策略表现出较强的鲁棒性。

未来工作中,可考虑纳入多种温控负荷的模型。同时可关注需求侧响应中用户激励方案及其对控制策略带来的影响。此外,还可针对高光伏渗透率场景,充分利用分布式光伏的无功电压调节能力,研究其与空调负荷的联合电压管理策略。

本文研究受到广东省教育厅:新一代综合能源系统理论与技术研究团队资助项目(2016KCXTD022)支持,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/>)

aeps/ch/index.aspx),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 杨济如,石坤,崔秀清,等.需求响应下的变频空调群组削峰方法[J].电力系统自动化,2018,42(24):44-56.
YANG Jiru, SHI Kun, CUI Xiuqing, et al. Peak load reduction method of inverter air-conditioning group under demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 44-56.
- [2] MALIK A, HAGHDADI N, MACGILL I, et al. Appliance level data analysis of summer demand reduction potential from residential air conditioner control [J]. Applied Energy, 2019, 235: 776-785.
- [3] YI H, HAJIESMAILI M H, ZHANG Y, et al. Impact of the uncertainty of distributed renewable generation on deregulated electricity supply chain [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 6183-6193.
- [4] 蔡永翔,唐巍,徐鹏洋,等.含高比例户用光伏的低压配电网电压控制研究综述[J].电网技术,2018,42(1):220-229.
CAI Yongxiang, TANG Wei, XU Ouyang, et al. Review of voltage control research in LV distribution network with high proportion of residential PVs [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 220-229.
- [5] 刘洪,徐正阳,葛少云,等.考虑储能调节的主动配电网有功—无功协调运行与电压控制[J].电力系统自动化,2019,43(11): 51-62.
LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 51-62.
- [6] 乐健,周谦,王曹,等.基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究[J].中国电机工程学报,2020,40(4):1249-1257.
LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on voltage and power optimal control strategy of distribution network based on distributed collaborative principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1249-1257.
- [7] OTHMAN M M, AHMED M H, SALAMA M M A. A coordinated real-time voltage control approach for increasing the penetration of distributed generation [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 699-707.
- [8] LAI C S, MCCULLOCH M D. Levelized cost of electricity for solar photovoltaic and electrical energy storage [J]. Applied Energy, 2017, 190: 191-203.
- [9] XU X, LI J, XU Z, et al. Enhancing photovoltaic hosting capacity—a stochastic approach to optimal planning of static var compensator devices in distribution networks [J]. Applied Energy, 2019, 238: 952-962.
- [10] 蔡永翔,唐巍,张璐,等.基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J].电力系统自动化,2017,41(13): 133-141.
CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-mode

- voltage control in low distribution networks based on reactive power regulation of photovoltaic inverters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 133-141.
- [11] SONG M, GAO C, YAN H, et al. Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 5522-5534.
- [12] ALHAIDER M, FAN L. Planning energy storage and photovoltaic panels for demand response with heating ventilation and air conditioning systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 5029-5037.
- [13] LUO F, ZHAO J, DONG Z Y, et al. Optimal dispatch of air conditioner loads in southern China region by direct load control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 439-450.
- [14] 王怡岚,童亦斌,黄梅,等.基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J].电网技术,2017,41(2):394-401.
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394-401.
- [15] 郝金宝,张勇军,刘泽槐,等.基于空调负荷温差-功率特性的博弈分层优化调度[J].电力系统自动化,2020,44(7):70-82.
HAO Jinbao, ZHANG Yongjun, LIU Zehuai, et al. Hierarchical game optimization scheduling based on temperature difference and power characteristics of air-conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 70-82.
- [16] 徐青山,杨辰星,颜庆国.计及规模化空调热平衡惯性的电力负荷日前削峰策略[J].电网技术,2016,40(1):156-163.
XU Qingshan, YANG Chenxing, YAN Qingguo. Strategy of day-ahead power peak load shedding considering thermal equilibrium inertia of large-scale air conditioning loads [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 156-163.
- [17] WU X, WU R, WANG D, et al. Coordinated air conditioning resources scheduling with high photovoltaic penetrations [C]// IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), November 6-8, 2018, Guangzhou, China: 2242-2248.
- [18] WANG D, WU R, LI X, et al. Two-stage optimal scheduling of air conditioning resources with high photovoltaic penetrations [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 1-14.
- [19] STASZCZUK A, KUCZYNSKI T. The impact of floor thermal capacity on air temperature and energy consumption in buildings in temperate climate [J]. Energy, 2019, 181: 908-915.
- [20] GAO X, MENG K, WANG D, et al. Optimal wind turbine and air conditioner loads control in distribution networks through MILP approach [C]// IEEE PES General Meeting, July 17-21, 2016, Boston, USA: 1-5.
- [21] WANG D, MENG K, GAO X, et al. Optimal air-conditioning load control in distribution network with intermittent renewables [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 55-65.
- [22] BALAN R, COOPER J, CHAO K, et al. Parameter identification and model based predictive control of temperature inside a house [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2): 748-758.
- [23] CHEN S, CHEN Q, XU Y, et al. Strategic bidding and compensation mechanism for a load aggregator with direct thermostat control capabilities [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2327-2336.
- [24] IKEDA S, OOKA R. Application of differential evolution-based constrained optimization methods to district energy optimization and comparison with dynamic programming [J]. Applied Energy, 2019, 254: 1-8.
- [25] 倪伟,赵平.基于平均理论的高阶线性多智能体系统在切换拓扑下的趋同控制问题综述[J].系统科学与数学,2015,35(10): 1146-1160.
NI Wei, ZHAO Ping. Review on averaging-based consensus of high-order multi-agent linear systems [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2015, 35(10): 1146-1160.
- [26] ZHANG Z, OCHOA L F, VALVERDE G. A novel voltage sensitivity approach for the decentralized control of DG plants [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1566-1576.
- [27] 李振坤,陈思宇,符杨,等.基于时序电压灵敏度的有源配电网储能优化配置[J].中国电机工程学报,2017,37(16):4630-4640.
LI Zhenkun, CHEN Siyu, FU Yang, et al. Optimal allocation of ESS in distribution network containing DG base on timing-voltage-sensitivity analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4630-4640.
- [28] ZHENG Y, HILL D J, SONG Y, et al. Optimal electric spring allocation for risk-limiting voltage regulation in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 273-283.
- [29] 国家气象信息中心.广东省广州市历史气象数据2019.7.1—2019.8.1[EB/OL].[2020-04-20].http://data.cma.cn/.
National Meteorological Information Center. Historical weather data of Guangzhou, Guangdong Province 2019.7.1—2019.8.1 [EB/OL]. [2020-04-20]. http://data.cma.cn/.
- [30] VIANA M S, GIOVANNI M, UDAETA M E M, et al. Analysis of demand response and photovoltaic distributed generation as resources for power utility planning [J]. Applied Energy, 2018, 217: 456-466.

吴润基(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源发电与控制、需求侧响应、智能计算。E-mail: runjiwu@foxmail.com

王冬晓(1990—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:新能源并网、需求侧响应、电力系统大数据分析。E-mail: darikwang@126.com

谢昌鸿(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源发电与储能优化配置、需求侧响应、智能计算。E-mail: 347889136@qq.com

(编辑 王梦岩)

Distributed Control Method for Air-conditioning Load Participating in Voltage Management of Distribution Network

WU Runji¹, WANG Dongxiao^{1,2}, XIE Changhong¹, LAI C S^{1,3}, HUANG Jiachang¹, LAI L L¹

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Australia Energy Market Operator, Melbourne 3000, Australia;

3. Department of Electronic and Computer Engineering, Brunel University, London UB8 3PH, UK)

Abstract: The scale of air-conditioning load in the distribution network is rapidly increasing with the improvement of living level. Furthermore, the buildings equipped with air conditioners have the capability of thermal buffer, which makes it valuable for participating in demand-side response. In the meanwhile, the penetration rate of distributed photovoltaic (PV) power generation in the distribution network is gradually increasing. The fluctuations of PV power generation have a negative impact on the voltage stability of the distribution network. This paper proposes a distributed consensus-driven control method. The aggregated air-conditioning load is scheduled to participate in the voltage management of the distribution network through the limited communication links established between the aggregators. A two-dimensional thermal parameter model is adopted to calculate the thermal exchange of the buildings equipped with air conditioners more accurately to guarantee the thermal comfort requirement of users. Finally, the case studies are performed on a modified IEEE 15-bus distribution network to verify the effectiveness and robustness of the proposed control strategy.

Key words: air-conditioning load; distributed control; voltage management; distributed photovoltaic (PV) power generation; active distribution network

