基于相变储能系统主动响应能力挖掘的配电网经济调度

杜进桥¹,李 艳¹,随 权²,李雪松³,胡志豪²,冯忠楠²,林湘宁²,李正天² (1. 深圳供电局有限公司,广东深圳 518000;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074;

3. 三峡大学 电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:为了解决配电网面临的供电电压不合格和潮流分布欠优等问题,提出基于相变储能系统(PCMTESS)需 求响应的配电网经济调度策略。介绍PCMTESS的构造和工作机理,分析热力侧的能耗规律,建立计及热耗 散的热力侧和计及无功调节能力的电力侧封装模型。在此基础上,考虑潮流分布约束和分布式新能源出力 特性,以配电网的购电成本最小化为目标,在综合考虑光伏、风机、负荷不确定性的条件下,建立统一的配电 网调度模型。提出主、子问题交互迭代的求解策略,实现优化模型的高效求解。基于IEEE 41 节点配电网的 仿真结果表明,所提PCMTESS在维持室温舒适的前提下,能够优化配电网的潮流分布和改善电网的电能质 量;所提调度模型为配电网的安全经济调度和综合能源消纳问题的解决提供了一个崭新的视角。

关键词:配电网;潮流分布;相变储能系统;主动响应;经济调度

中图分类号:TM 734

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003010

0 引言

随着新能源渗透率的激增,具有随机性、波动性 以及反调峰特性的新能源并网将给电网的实时功率 平衡和安全稳定运行带来极大的挑战^[1]。以往,研 究者的关注点更多聚焦在大型风电或光伏电站对大 电网运行的影响,随着主动配电网的兴起,配电网中 的新能源消纳问题也日渐迫切。优化电网的运行方 式是解决新能源并网问题的可行手段,但受限于负 荷的分布方式和网络拓扑约束,大部分配电网的运 行方式调整空间有限,不能从根本上解决问题。增 加储能环节是更好的解决之道,例如,化学电池储能 电站就是一种有效的解决方案。但是,由于其接入 点有限,成本相对高昂,易引发公众对环境污染问题 的担忧,特别是这类电站的消防安全问题尚未得到 彻底解决,大面积推广还存在一定的限制^[2-3]。因 此,亟需寻找一种与配电网运行需求更加适配的替 代储能方式。

另一方面,研究表明,家居建筑的能耗十分可 观,占社会总能耗的1/3以上,且采暖、通风、制冷能 耗占非工业生产建筑能耗的60%以上^[4]。文献[5] 利用蓄热式电锅炉供热,将电能转化为热能,提高风 电就地消纳的能力。文献[6]指出空调-建筑系统具 有热储备能力,可将其纳入临时性削峰指令中。文

收稿日期:2019-05-16;修回日期:2020-01-14

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51537003);南方 电网公司科技项目(090000KK52180027)

Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51537003) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(0900-00KK52180027) 献[7]利用熔融盐作为蓄热介质,将低谷电、弃风电、 弃光电等电能转换为高品位热能进行存储。文献 [8] 基于电热泵的运行特性建立电-热能量转换模 型,利用热泵空调系统给用户供暖。可见,有关电转 热储能的研究已经具备了坚实的理论基础,且这种 储热负荷可借助调度侧的智能终端直接控制,同时 参与的用户可获得相应的补偿[9]。但是,上述储热 负荷均不具备长时间尺度的储能能力,因此留给系 统优化调控的裕度有限。长时间尺度储冷、储热的 关键在于储能材料的选择。近年来,具备长时间尺 度储能能力的相变材料 PCM (Phase Change Material)受到了广泛的关注。文献[10]介绍了相变材料 的特性及其嵌入居民建筑的方法;文献[11]在此基 础上建立了相变储能系统 PCMTESS(Phase Change MaTerial Energy Storage System)的热力学模型;文 献[12-13]进行了进一步的探索,建立了计及光照强 度对 PCMTESS 热耗散影响的电力--热力联合调度模 型,为本文的研究奠定了良好的基础。

上述文献论证了 PCMTESS 具有良好的热力学 特性和光明的应用前景,但是,均未将 PCMTESS 的 无功调节能力纳入电力系统调度策略的设计中。此 外,上述文献还忽略了配电网中不确定因素造成的 风险,可能导致现有的调度策略在实际运行中并不 适用。

事实上,针对配电网中不确定因素的风险,已有 研究利用随机规划方法、鲁棒优化方法进行建模求 解。文献[14]建立了随机规划发电调度模型,讨论 了不同风险偏好程度下电力系统的经济性和风险水 平之间的关系;文献[15]构建了考虑电价不确定性 的配电网网损成本鲁棒优化模型,分析了不同优化 目标下电价波动以及需求响应和储能调度策略对配 电网运行成本的影响。但是,上述研究仅考虑了发 电侧不确定性因素的影响,对于用电侧不确定性因 素的影响几乎未曾涉及。以光照强度为例,光照强 度的不确定性不仅会影响配电网的电力产出和潮流 分布,更决定了家居建筑的热耗散水平,这种多维度 耦合增加了风险条件下能量调度策略的制定难度。

针对上述问题和挑战,本文首先引入文献[16] 建立的PCMTESS热力学模型,分析热力侧的能耗规 律,并建立计及热耗散的热力侧和计及无功调节能 力的电力侧封装模型。在此基础上,综合考虑光伏、 风机、负荷不确定性的因素,将潮流分布约束和分布 式新能源出力特性纳入考量,以配电网购电成本最 小化为目标,建立统一的配电网调度模型。为了实 现优化模型的高效求解,提出主、子问题交互迭代的 求解策略。最后,基于IEEE 41节点仿真系统的算 例分析结果表明,本文所提方案能在维持室温舒适 的前提下,大幅缩减用户的购电成本,并且可以优化 配电网的潮流分布和改善电网的电能质量,实现电 网与用户的双赢。

1 PCMTESS 模型

图1为含有高渗透率分布式新能源的配电网示 意图,其中,光伏、风机分布于馈电线路的不同节点 处,居民负荷包含常规负荷和制冷/制热负荷。在 智能建筑中,相变材料被封装在墙体夹聚乙烯(PE) 管道中构成PCMTESS,如附录A中图A1所示。它作 为一种储热材料,能够将电能以相变潜热的形式进 行贮存和释放,在此过程中自身温度几乎不变。具 体而言,电力系统与热力系统通过热泵耦合,实现电 能向热能的转化。然后,以制冷剂为介质,将热能传 输并存储于相变储能墙体中。另一方面,通过控制 风扇的转速能够加快PCMTESS的热耗散,从而实现 室内的温控目的。





Fig.1 Schematic diagram of distribution network with high permeability distributed renewable energy

1.1 PCMTESS 热力侧模型

PCMTESS作为建筑的组成部分,兼具储能与温 控功能,需要指出的是,环境因素如光照强度的不确 定性不但影响配电网的电力产出和潮流分布,而且 决定了PCMTESS的热耗散水平,因此不能简单地用 热损失模型表示,对其进行分析需要考虑太阳光照、 气温等环境与自身结构的影响。下面对其进行热力 网络建模与分析。

(1)相变储能墙体内空气部分热力交换满足:

 $E_{ar}(t) = E_{pa}(t) + E_{aa}(t) + E_{ia}(t) + E_{ra}(t)$ (1) 其中, $E_{ar}(t)$ 为墙板气隙与业主室内空气对流在t时段的热交换量; $E_{pa}(t)$ 为相变材料与储能墙空气部分 在t时段的热交换量; $E_{aa}(t)$ 为墙板外层与储能墙空 气部分在t时段的热交换量; $E_{aa}(t)$ 为墙板内层与储 能墙空气部分在t时段的热交换量; $E_{ia}(t)$ 为墙板内层与储 能墙空气部分在t时段的热交换量; $E_{ra}(t)$ 为室内空 气与储能墙空气在t时段的热交换量。

(2)相变材料在管道中的热力交换满足:

$$H_{\rm p}(t) = \int_{T_{\rm p,0}}^{T_{\rm p}(t)} m_{\rm p} C_{\rm pm} \,\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

$$dH_{p}(t)/dt = -E_{pa}(t) + E_{op}^{r}(t) + E_{ip}^{r}(t) + E_{HP}(t) \quad (3)$$

$$E_{\rm op}^{\rm r}(t) = h_{\rm op}^{\rm r}(T_{\rm o}(t) - T_{\rm ag}(t))$$
(4)

$$E_{\rm ip}^{\rm r}(t) = h_{\rm ip}^{\rm r}(T_{\rm i}(t) - T_{\rm ag}(t))$$
(5)

其中, $T_{se}(t)$ 、 $T_{p}(t)$ 、 $T_{i}(t)$ 、 $T_{o}(t)$ 分别为储能墙体与PE 管道间填充物、相变材料、储能墙体内层、储能墙体 外层在t时段的温度; $T_{p,0}$ 为相变材料的初始温度,— 般取 20 °C; m_{p} 、 C_{pm} 分别为相变材料的质量、比热容; h_{op}^{r} 、 h_{ip}^{r} 分别为装有相变材料的管道与墙体外层、内 层的辐射换热系数; $E_{op}^{r}(t)$ 、 $E_{ip}^{i}(t)$ 分别为相变材料在 t时段与墙体外层、内层的热交换量; $E_{HP}(t)$ 为t时段 热泵的产热量。

(3)相变储能墙体内部和外部的热力交换满足:

$$E_{\rm am}(t) = E_{\rm out}^{\rm c}(t) \tag{6}$$

$$E_{\text{out}}^{\text{c}}(t) = m_{\text{o}} \mathrm{d}H_{\text{o}}/\mathrm{d}t - E_{\text{oa}}(t) - E_{\text{op}}^{\text{r}}(t)$$
(7)

$$-E_{ia}(t) - E_{ip}^{r}(t) = m_{i} dH_{i}/dt + E_{ir}(t) + \sum_{i=1}^{n_{vall}} E_{pwi-i}^{r}(t)$$
(8)

其中, $E_{am}(t)$ 为t时段墙体外表面与外部自然环境的 热交换量; $E_{out}^{c}(t)$ 为t时段外墙的外表面与内表面之 间的导热量; $E_{ir}(t)$ 为t时段相变储能墙内层与业主 室内空气之间的导热量, $E_{pwi-i}^{r}(t)$ 为t时段相变储能 墙内层和建筑物其他墙体之间的热交换量; m_{i} 、 m_{o} 分 别为相变储能墙体内、外板的质量; H_{i} 、 H_{o} 分别为内、 外板的单位质量的焓; n_{wall} 为相变储能房间的墙 板数。

(4)相变材料的热量满足:

$$E_{\rm HP}(t) = C_{\rm HP} P_{\rm HP}(t) \tag{9}$$

$$S_{\rm SOC}(t) = H_{\rm p}(t)/H_{\rm p}^{\rm max}$$
(10)

$$H_{\rm p}^{\rm max} = m_{\rm PCM} \Delta H_{\rm PCM} \tag{11}$$

其中, $P_{HP}(t)$ 为t时段热泵的电功率; C_{HP} 为热泵的电 热转换系数,本文中其取值为2.6; $S_{SOC}(t)$ 为t时段 PCMTESS的荷电状态(SOC); H_{p}^{max} 为PCMTESS的容 量上限;m_{PCM}为相变材料的总质量;ΔH_{PCM}为在相变 过程中单位质量相变材料的焓差。

1.2 PCMTESS 电力侧模型

PCMTESS通过热泵与电力侧发生联系,为了满 足接入点的功率等级以及谐波电流限制等因素, PCMTESS的换流设备逐渐被三相可控的换流器取 代,具体结构如附录A中图A2所示,AC-DC-AC构成 了 PCMTESS的变频器结构。经过脉宽调制(PWM) 控制,这2个级联的换流器不但能够连续调节有功 功率,而且还具备无功调节的能力。

热泵存在额定功率限制和爬坡速率约束,如式 (12)—(15)所示。

$$0 \le P_{\mathrm{HP},i}(t) \le P_{\mathrm{HP}}^{\mathrm{max}} \tag{12}$$

$$0 \le P_{\text{HP},i}^{2}(t) + Q_{\text{HP},i}^{2}(t) \le S_{\text{HP},\max}^{2}$$
(13)

$$\Delta \underline{P}_{\mathrm{HP}} \leqslant P_{\mathrm{HP},i}(t) - P_{\mathrm{HP},i}(t-1) \leqslant \Delta \bar{P}_{\mathrm{HP}} \qquad (14)$$

$$\Delta \underline{Q}_{\text{HP},i} \leq Q_{\text{HP},i}(t) - Q_{\text{HP},i}(t-1) \leq \Delta \overline{Q}_{\text{HP}} \qquad (15)$$

其中, $P_{\text{HP}}^{\text{max}}$ 、 $S_{\text{HP,max}}$ 分别为热泵的有功功率、视在功率 上限; $Q_{\text{HP},i}(t)$ 为t时段热泵i的无功功率; $\Delta \underline{P}_{\text{HP}}$ 、 $\Delta \bar{P}_{\text{HP}}$

2 配电网能量管理系统

2.1 电源模型

(1)光伏发电模型。

光伏电池输出总功率 $P_{\rm PV}(t)$ 的表达式为:

 $P_{PV}(t) = P_{STC}G_{AC}(t) [1 + \varepsilon(T_{c}(t) - T_{r})]/G_{STC}$ (16) 其中, P_{STC} 为标准测试条件下光伏电池输出的最大 测试功率; $G_{AC}(t)$ 为t时段的光照强度; G_{STC} 为标准测 试条件下的光照强度,取值为1 kW / m²; ε 为功率温 度系数; $T_{c}(t)$ 为t时段电池板的工作温度; T_{r} 为参考 温度。

(2)风机发电模型。

$$P_{w}(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ \frac{P_{WR}}{v_{r}^{3} - v_{ci}^{3}} (v^{3} - v_{ci}^{3}) & v_{ci} \le v \le v_{r} \\ P_{WR} & v_{r} < v \le v_{co} \\ v = f(t) \implies P_{w}(t) = P_{w}(v) \end{cases}$$
(18)

其中, v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速; v_r 为额定风速; P_{wR} 为额定风速下风机的有功功率;v为该风电场的 风速值; $P_w(v)$ 为风速v下风机的有功功率。

(3)大电网交换功率模型。

定义配电网向大电网的交换功率设为 $P_{co}(t)$, 相应的电价为p,具体取值如附录 B中表 B1 所示^[17]。 2.2 **潮流分布模型**

由文献[18]可知,配电网中相邻节点电压的相

角偏离较小,潮流可近似采用不含相角的方程表示, 标准形式见式(19)一(25)。其中,式(19)和式(20) 分别为支路的有功、无功功率平衡约束;式(21)基于 欧姆定律,表示了相邻节点电压的关系;式(22)根据 视在功率和节点电压计算电流;式(23)和式(24)分 别定义了电压和支路电流的二次形式;式(25)为支 路网损。

$$P_{j}(t) = P_{ij,i}(t) - r_{ij}\ell_{ij}(t) - \sum_{\forall k, k \neq i} P_{jk,j}(t)$$
(19)

$$Q_{j}(t) = Q_{ij,i}(t) - x_{ij}\ell_{ij}(t) - \sum_{\forall k, k \neq i} Q_{jk,j}(t)$$
(20)

$$\nu_{j}(t) = \nu_{i}(t) - 2(r_{ij}P_{ij,i}(t) + x_{ij}Q_{ij,i}(t)) + (r_{ij}^{2} + x_{ij}^{2})\ell_{ij}(t)$$
(21)

$$\ell_{ij}(t) = (P_{ij,i}^2(t) + Q_{ij,i}^2(t))/\nu_i(t)$$
(22)

$$\ell_{ii}(t) = I_{ii}^{2}(t)$$
 (23)

$$\nu_j(t) = V_j^2(t) \tag{24}$$

$$P_{\text{loss},ij}(t) = \ell_{ij}(t)r_{ij} \tag{25}$$

其中, r_{ij} , x_{ij} 分别为支路ij的等效电阻、电抗; $P_{ij,i}(t)$ 、 $Q_{ij,i}(t)$ 分别为t时段从支路ij的节点i侧流入的有功、 无功功率; $I_{ij}(t)$ 、 $\ell_{ij}(t)$ 分别为t时段支路ij流过的电 流以及相应电流的平方; $V_{j}(t)$ 、 $\nu_{j}(t)$ 分别为t时段节 点j的电压以及相应电压的平方; $P_{loss,ij}(t)$ 为t时段支 路ij的网损。

配电网含有有载变压器,则有:

$$\nu_{j}(t)/k_{ij}^{2} = \nu_{i}(t) - 2(r_{ij}P_{ij,i}(t) + x_{ij}Q_{ij,i}(t)) + (r_{ij}^{2} + x_{ij}^{2})\ell_{ij}(t)$$
 (26)

其中,*k_{ij}*为支路*ij*的变压器抽头,取值为1±2×2.5%。 根据功率平衡关系,可得配电网与外界电网的

交换功率为: $P_{(t)} = \sum (P_{(t)} + P_{(t)} - P_{(t)})$

$$Y_{\text{exc}}(t) = \sum (P_{\text{PV},i}(t) + P_{\text{w},i}(t) - P_{\text{else},i}(t) - P_{\text{else},i}(t) - P_{\text{HP},i}(t) - P_{\text{loss},ij}(t))$$
(27)

其中, $P_{exc}(t)$ 为t时段配电网与外界电网的交换功率,若 $P_{exc}(t) \ge 0$ 则表示配电网处于售电状态,若 $P_{exc}(t) < 0$ 则表示配电网处于购电状态; $P_{else,i}(t)$ 为t时段接入节点i的常规负荷有功功率。

2.3 负荷模型

与配电网节点*i*相连的热泵的功率、常规负荷以及可再生能源出力之和决定了该节点注入的有功功率 $P_i(t)$ 和无功功率 $Q_i(t)$,分别如式(28)和式(29) 所示。

 $P_{i}(t) = P_{\text{HP},i}(t) + P_{\text{else},i}(t) - P_{\text{w},i}(t) - P_{\text{PV},i}(t) \qquad (28)$

 $Q_i(t) = Q_{\text{HP},i}(t) + Q_{\text{else},i}(t) - Q_{\text{w},i}(t) - Q_{\text{PV},i}(t) \quad (29)$ 其中, $Q_{\text{else},i}(t)$ 为接入节点 *i* 的常规负荷无功功率。

$$P_{\rm GD}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\rm PV}} P_{\rm PV,i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\rm W}} P_{\rm w,i}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\rm HP}} P_{\rm HP,i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\rm ebs}} P_{\rm else,i}(t)$$
(30)

其中,N_{PV}、N_W、N_{HP}、N_{else}分别为配电网内光伏电池、风机、热泵、常规负荷的数量。

2.4 目标函数与约束条件

风、光等可再生能源存在预测误差,将对配电网的安全、经济运行等产生显著的影响。为此,本文提出采用场景生成法^[18]模拟风、光出力的不确定性,从 而做出更有效的日前调度策略。

2.4.1 场景生成与削减

场景生成法是模拟电力系统运行状态的一种重要方法,可有效处理运行中的随机现象,本文将采用蒙特卡洛模拟产生场景,由于配电网的运行状态受到光伏发电、风力发电和常规负荷的影响,因此配电网在*t*时段的运行状态时间序列为一个场景*s*,如式(31)所示。

$$s = \{ \tilde{P}_{\rm PV}, \tilde{P}_{\rm w}, \tilde{P}_{\rm else} \}$$
(31)

其中, \tilde{P}_{PV} 、 \tilde{P}_{w} 、 \tilde{P}_{else} 分别为t时段光伏功率、风电功率 和常规负荷的标幺值。由配电网可能出现的状态场 景构成的集合称为场景集S。虽然场景模拟解决了 配电网中风、光、负荷的随机现象,但大量的场景引 入增加了计算的负担。本文采用同步回代缩减法进 行场景缩减^[19],生成一个与原场景集概率距离最短 的近似场景子集,这样既保证了可信度又降低了计 算的复杂度。

针对某个场景*m*,其在*T*个时段内的场景状态 时间序列表示为{ λ_1^m , λ_2^m ,…, λ_{T-1}^m ,其中 λ_t^m 为*t* 时段光伏出力、风速和常规负荷形成的标幺化坐标, 则场景*s*^m和场景*s*ⁿ之间的距离可通过式(32)计算 得到。

$$d(s^{m}, s^{n}) = \left[\sum_{t=1}^{T} \left(\lambda_{t}^{m} - \lambda_{t}^{n}\right)^{2}\right]^{1/2}$$
(32)

设*N*_s为场景缩减过程中被削减的场景集合指标集,删除的场景个数为*N*₁,同步回代缩减法的步骤如下。

(1)设置被削减的场景集合指标集Ns为空集。

(2)设 s^m 发生的概率为 ρ_m ,计算 $\rho_m \min\{d(s^m, s^n)\}$, 其中有 $s^m, s^n \in S$ 并且 $m \neq n$,可以得到当 $m = b_1$ 时, $\rho_m \min\{d(s^m, s^n)\}$ 最小,置指标集 $N_{s}^{(1)} = \{b_1\}$ 。

(3)设第 k 次迭代时需删除场景 s^{b} , 当 $b=b_{k}$ 时, $\sum \rho_{m} \min \{ d(s^{m}, s^{n}) \}$ 最小。其中, $m \in N_{s}^{(k-1)} \cup \{ b \}$, $n \notin N_{s}^{(k-1)} \cup \{ b \}$ 。删除该场景,并且使得 $N_{s}^{(k)} = N_{s}^{(k-1)} \cup \{ b_{k} \}$ 。

(4)继续迭代削减场景,直到削减场景数为 N_1 , 被削减的场景由所保留的场景中与之距离最近的场景替代,并将删减场景的概率与其替代场景的概率 相加,即 $\rho_n = \rho_n + \sum \rho_m (m \in N_s)_o$ 2.4.2 目标函数和约束条件

以配电网用电成本最小为调度目标,设计电力

侧调度问题F_d,如下所示:

$$F_{\rm d}:\min\sum_{n=1}^{N} \rho_n \sum_{t=1}^{T} P_{\rm GD}^{(n)}(t) p(t)$$
(33)

s.t.
$$\begin{cases} \overline{x}_{i}(12) - (30) \\ 0 \leq \ell_{ij}(t) \leq \overline{\ell}_{ij} \\ \nu_{\min} \leq \nu_{i}(t) \leq \nu_{\max} \end{cases}$$
(34)

其中, $P_{GD}^{(n)}(t)$ 为场景n中t时段的购电或者售电功率; ρ_n 为场景n出现的概率;N为场景数; ν_{max} 、 ν_{min} 分别为 节点电压平方的上、下限; $\bar{\ell}_{ij}$ 为支路ij流过电流平方 的上限。

储热系统释放的能量 $E_{pa}(t)$ 由可控的强制空气 对流换热和不可控的热泄漏构成。其中,在储能系 统的输出控制中,强制对流空气量 $m_A(t)$ 是唯一可被 储能系统控制的变量。因此,热力学调度子问题 F_{sp} 被设计为优化可控的强制空气对流换热,即 $m_A(t)$ 。 在T个时段内 F_{sp} 可表示为:

$$F_{\rm sp}:\min\sum_{t=1}^{t}m_{\rm A}(t) \tag{35}$$

s.t.
$$\vec{x}(1) - (11)$$

$$0 \leq H_{p,i}(t) \leq H_{p} \qquad (36)$$
$$H_{p}(T) = H_{p}(T) \qquad (27)$$

$$\begin{array}{l}
 H_{p,i}(T_0) - H_{p,i}(T) & (37) \\
 T_{r,\min} \leq T_r(t) \leq T_{r,\max} & (38)
 \end{array}$$

其中,式(36)和式(37)为储能容量约束, T_0 为调度起 始时段;式(38)为室温约束, $T_r(t)$ 为t时段的室内温 度, $T_{r,min}$ 、 $T_{r,max}$ 分别为人体所能接受的适宜温度的下 限值与上限值。

3 模型求解

3.1 模型转换

(1)潮流模型凸化处理。

对式(26)进行锥松弛凸化处理,即:

$$I_{ij}(t)\nu_{i}(t) \ge P_{ij,i}^{2}(t) + Q_{ij,i}^{2}(t)$$
(39)

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,i}(t) \\ 2Q_{ij,i}(t) \\ l_{ij}(t) - \nu_{i}(t) \\ \end{array} \right\|_{2} \leq I_{ij}(t) + v_{ij}(t)$$
 (40)

其中, $v_{ii}(t)$ 为节点 i_{ij} 的相对电压。

(2)有载调压器调压处理。

采用文献[20]所提的大M法处理有载调压器分级调压的问题。由于空间有限,在此不做详述。

3.2 求解算法

处理后的优化模型为经典的混合整数二阶锥规 划问题,本文将其分解为主、子问题,采用交互迭代 的方法求出最优值。

为了提高优化模型的计算速度,本文提出了交 互迭代的方法求解热力侧和电力侧子问题。以日前 调度层为例,迭代过程如下。 步骤1:初始化。输入参数包括光照强度、常规电负荷、热负荷和建筑参数以及预估的热泵功率 $P_{\rm HP}^*(t)$ 。此外,设置迭代次数 $n_{\rm iter}=1$ 、最大迭代次数 $n_{\rm iter}$ 和误差 ε 。

步骤2:求解热力侧子问题。用 γ 表示热力侧目 标函数,即 $\gamma = \sum_{t=1}^{T} m_A(t)$,因此目标函数式(35)和约 束条件式(1)—(11)、(36)—(38)被转化为:

$$F_{\rm sp}:\min\gamma$$
 (41)

s.t.
$$\vec{x}(1) \longrightarrow (11)$$

 $\gamma \ge \sum_{i=1}^{r} S(t)$ (42)

$$S(t) \ge 0 \quad \forall t \tag{43}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm HP}} P_{{\rm HP},i}(t) - S(t) = \sum_{i=1}^{N_{\rm HP}} P_{{\rm HP},i}^*(t) \quad \forall t \quad (44)$$

其中, $\sum_{i=1}^{n_{\text{IP},i}} P_{\text{HP},i}(t)$ 为以热泵维持室内人体适宜温度所需的实际总功率; S(t) 为主问题对热力侧子问题热泵功率的修正值, 热力侧子问题的目标函数如式(41)所示, 即使主、子问题间的修正值S(t)最小。

从优化结果中提取目标函数值 γ 和热泵功率 $P_{\text{HP},i}(t)$ 。

步骤3:检查终止条件。有2个判据:① $n_{iter}>n_{iter_max}$; ② $\gamma \le \varepsilon$ 。如果满足判据①或判据②,则停止迭代;否则,令 $P_{HP,i}^{*}(t) = P_{HP,i}(t)$,转步骤4。

步骤4:求解电力侧调度子问题。以式(12)— (30)、(34)和 $\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{HP}} P_{HP,i}(t) = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{HP}} P_{HP,i}^{*}(t)$ 为约束条件,求解目标函数式(33)。

步骤5:更新。令 $P_{\text{HP},i}^{*}(t) = P_{\text{HP},i}(t)$,返回步骤2。

4 仿真分析

4.1 仿真环境

将调度策略优化的实施场景抽象为如附录A中 图A3所示的IEEE 41节点能源网络的简化结构,配 电网的额定电压为16kV,各支路长度、电阻值等相 关参数见文献[21]。本文以配电网的视角制定购电 策略,将某类负荷看作同类负荷的聚合体。基于附 录A中图A3对2种方案进行对比分析。常规负荷 和风电、光伏的功率分布如附录A中图A4所示。

假设附录A中图A3所示的配电网中共有800 户智能家居用电。每个家庭装有PCMTESS制冷、制 热。每个PCMTESS的额定容量为50kW·h,热泵的 额定功率为3kW(电热转换系数为2.6)。室内人体 适宜温度范围设置为24~26℃。

4.2 调度结果分析

需要指出的是,光照强度不仅影响配电网的电

力产出,同时还影响建筑的热耗散水平。以式(33) 为目标函数,分别以考虑光照强度对热耗散水平的 影响和不考虑光照强度对热耗散水平的影响设计调 度方案,结果如附录A中图A5所示。

由附录A中图A5可以看出,相较于考虑光照强 度对热耗散水平的影响的调度方案,当不考虑光照 强度对热耗散水平的影响时,PCMTESS的购电功率 较小,且在光照强度较大的11:00—16:00时段内, 这种差异尤为明显。这是因为光照强度越大,室内 温度流失的速度也越快,为了维持人体适宜温度, PCMTESS不得不提升自身的功率用以维持室温。

为了体现应用PCMTESS的优越性,设置空调负 荷作为本文的对比方案。相关方案设置如下:方案 1,采用PCMTESS制冷、制热;方案2,采用空调制冷、 制热。空调的电热转化效率与热泵保持相等,且不 具备无功调节能力。方案1和方案2均以式(33)为 目标函数建立优化模型制定能量调度策略。方案1 和方案2在实时电价下的购电功率如图2所示,热泵 和空调功率如图3所示。方案1下PCMTESS的SOC 如附录A中图A6所示,室外温度和2种方案下的室 内温度如附录A中图A7所示。



Fig.2 Real-time electricity price and purchase power under two schemes







由图2可知,方案1具备多个时段用电电价低廉的优势,并保持对低廉电力的密切跟踪。在电价低廉的00:00—10:00时段,方案1共购电19:90 MW·h,除去此时段的常规负荷和网损消耗,共将12.34 MW·h的电能转化为热能储存到相变储热墙体中;由附录A中图A7、图2和图3可知,11:00—18:00 为一天中室外温度峰值时段,此时热需求处于旺盛阶段,旺盛的电能需求位于高电价时段,方案1前瞻性地利用

自身的储热 / 释热特性,在电价较高的11:00-22:00 时段,使相变墙体的热泵停止工作,将00:00-10:00 时段所存储的热能缓慢释放。从附录A中图A6可 以看出, PCMTESS的 SOC 在 11:00-18:00 时段由 0.94下降到0.32,在该时段内微网仅从大电网处购 入7.20 MW·h的电能满足刚性的常规负荷需求,在 22:00-24:00时段热泵重新工作将 3.67 MW · h 的电 能转化为热能进行储存,在调度周期末使 PCMTESS 的SOC重新回到初值,实现能量调度策略的可重复 性。方案2的购电功率紧随常规负荷及空调负荷的 波动,因其不配备储能装置,无法享受储低价电能用 于高价位使用的红利,在电价低廉的00:00-10:00 和23:00-24:00时段仅分别购电11.85、4.87 MW·h, 而在高电价的11:00-22:00时段却豪购35.01 MW·h 的电能。综上可见,方案1采用了"低卖高用"的策 略使自身运营成本最小化,由附录A中图A7可知方 案1和方案2均能维持室温在26℃的人体适宜温度 标准。

图4和图5分别为在附录A中图A5的场景下, 方案1和方案2下各个节点的电压分布(图中电压为 标幺值)。方案1下的PCMTESS内含AC-DC变流 器,具备面向电网的无功调节能力,必要时可以向系 统发出无功。由图4和图5可知,方案1可以保持配 电网各节点电压的偏离度维持在±5%以内,而方案 2下由于空调负荷缺乏无功调节能力,节点电压偏 差高达15%,严重威胁配电网的安全稳定运行。



图4 方案1下节点电压分布





图5 方案2下节点电压分布

Fig.5 Node voltage distribution of Scheme 2

然而,在实际应用中,负荷需求和新能源的出力 都是随机变化的,这可能使得基于确定性空调或 PCMTESS的解决方案无法使配电网电压维持在一 个安全的水平。为了检验这一点,本文基于蒙特卡 洛抽样方法随机生成了50个负荷和新能源出力场 景日,并抽取调度周期内电压跌落最恶劣情况对2 种方案进行检查,得到50个随机场景日的电压分 布,如附录A中图A8和图A9所示(图中电压为标 幺值)。

由附录A中图A8和图A9可以看出,方案1下随 机生成的50个场景日中配电网各节点的电压偏离 度始终保持在[-5%,5%]以内;方案2则会出现节 点电压跌落于下限值的情况。值得注意的是,节点 15和节点16之间跨接了1台有载调压器,导致方案 1和方案2下该处的电压均产生突变,但是附录A中 图A8所示的50个场景日下节点1—15的电压以及 节点16—41的电压相对数值均表明配电网电压分布 相对正常,即分布式电源接入的节点电压并无异状。 需要指出的是,节点16—41的电压偏离到0.93 p.u. 以下(最大向下偏离达到0.87 p.u.),这在实际运行 时分布式电源可能脱网,配电网将自动减载,由于此 处仅为客观呈现不同场景下 PCMTESS 相对空调方 案的优越性,因此未详加描述。

4.3 经济性分析

对方案1和方案2进行经济性对比,由附录B中 表B2可知,在调度周期内,方案1和方案2下配电网 分别向大电网购电43.68、51.73 MW·h,PCMTESS与 空调负荷的使用寿命按10a计,日综合成本分别为 3.88、5.43万元。即相较于方案2,方案1节省了1.55 万元成本,经济性提升了28.5%。由此可见,基于 PCMTESS响应的配电网调度方案具有显著的运行 经济性。

4.4 多目标对 PCMTESS 调度策略的影响

分布式电源的并网使得原有的配电系统由一个 辐射状网络变为一个高度交叉连接的遍布电源和用 户互联的网络,给节点电压、网损、可靠性等都会带 来极大的影响,本文进一步探究考虑网损(经济指标)和电压平均偏离程度(运行指标)的多目标对 PCMTESS调度策略的影响。

(1)系统网损可表示为:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_k} G_{k(i,j)} \Big[V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \Big]$$
(45)

其中, N_k 为系统支路数; $G_{k(i,j)}$ 为节点i,j之间支路的 电导; θ_i, θ_j 分别为节点i,j的电压相角。

(2)电压平均偏离程度可表示为:

$$V_{\rm ad} = \left(\sum_{i=1}^{n_{\rm total}} \left| V_i - V_{\rm N} \right| \right) / n_{\rm total} \tag{46}$$

其中, V_{N} 、 V_{i} 分别为节点的额定电压与实际电压; n_{total} 为节点总数。

通过对权系数的合理选择以及对上述2个指标 进行归一化处理,可以得到最终的目标函数为:

$$F = \varphi_1 P'_{\text{loss}} + \varphi_2 V'_{\text{ad}} \tag{47}$$

$$P'_{\rm loss} = (P_{\rm loss} - P_{\rm loss}^{\rm min}) / (P_{\rm loss}^{\rm max} - P_{\rm loss}^{\rm min})$$
(48)

$$V'_{\rm ad} = (V_{\rm ad} - V_{\rm ad}^{\rm min}) / (V_{\rm ad}^{\rm max} - V_{\rm ad}^{\rm min})$$
(49)

其中, φ_1 、 φ_2 为目标函数的权重系数; P'_{loss} 、 V'_{ad} 分别为 P_{loss} 、 V_{ad} 进行归一化后的值; P^{max}_{loss} 、 P^{min}_{loss} 和 V^{max}_{ad} 、 V^{min}_{ad} 分别为 P_{loss} 和 V_{ad} 的最大值、最小值。

不同目标下 PCMTESS 功率和配电网对外的交 换功率分别如附录A中图A10和图A11所示。由图 可知,考虑了系统网损、电压平均偏离程度指标下的 PCMTESS 功率不再基于电价引导,执行"储高价电 能用于低价使用"的策略。PCMTESS密切追踪使系 统网损、电压平均偏离程度指标降低的购电模式,在 电价高昂的08:00-15:00时段内仍处于工作状态, 但相较于配电网经济性单目标优化,多目标下配电 网与大电网的交换功率更为平缓,此外执行多目标 优化时的配电网网损由单目标优化下的0.71 MW·h 减小为0.60 MW·h。多目标下配网电压分布如附录 A中图A12所示。由图A12可以看出,在考虑风-光-荷不确定性的条件下,配电网各节点电压的偏离 程度进一步减小,始终维持在[-2%,5%]之内。综 上可知,考虑网损、电压平均偏离程度指标的多目标 优化可以更好地统筹计及配电网的电压偏离程度 (运行指标)和线路上的损耗(经济指标)。

5 结论

为了解决配电网面临的供电电压不合格和潮流 分布欠优等问题,本文在综合考虑风-光-荷不确定 性的条件下,提出基于 PCMTESS需求侧响应的配电 网经济调度策略。通过分析仿真结果,可以得出以 下结论:

(1)PCMTESS可以取代空调进行制冷 / 制热, 满足室温舒适的条件;

(2) PCMTESS 具备灵活的调节能力,能够优化 配电网的潮流分布和改善电压偏离程度;

(3)充分利用 PCMTESS 进行灵活响应,能够提高配电网的运行经济性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- 赵俊博,张葛祥,黄彦全.含新能源电力系统状态估计研究现 状和展望[J].电力自动化设备,2014,34(5):7-20,34.
 ZHAO Junbo,ZHANG Gexiang,HUANG Yanquan. Status and prospect of state estimation for power system containing renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment,2014, 34(5):7-20,34.
- [2] 颜志敏,王承民,郑健,等. 配电网中蓄电池储能系统的价值评 估模型[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):57-61.

YAN Zhimin, WANG Chengmin, ZHENG Jian, et al. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2):57-61.

- [3] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等.用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J].电力自动化设备,2017,37(8):3-11.
 XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):3-11.
- [4]张士杰,李字红,叶大均. 燃机热电冷联供自备电站优化配置 研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):183-188.
 ZHANG Shijie, LI Yuhong, YE Dajun. Optimal planning of a gas turbine CCHP plant[J]. Proceedings of the CSEE,2004, 24(10):183-188.
- [5] 李国庆,庄冠群,田春光,等.基于大规模储能融合蓄热式电锅 炉的风电消纳多目标优化控制[J].电力自动化设备,2018,38 (10):46-52,59.
 LI Guoqing,ZHUANG Guanqun,TIAN Chunguang, et al. Multiobjective optimization control of wind power consumption based on regenerative electric boiler system integrated with

large-scale energy storage[J]. Electric Power Automation Equip-

- ment,2018,38(10):46-52,59.
 [6] 艾欣,赵阅群,周树鹏. 空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1596-1603.
 AI Xin,ZHAO Yuequn,ZHOU Shupeng. Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(6):1596-1603.
- [7] 薛小代,陈晓弢,梅生伟,等.采用熔融盐蓄热的非补燃压缩空 气储能发电系统性能[J].电工技术学报,2016,31(14):11-20.
 XUE Xiaodai,CHEN Xiaotao,MEI Shengwei, et al. Performance of non-supplementary fired compressed air energy storage with molten salt heat storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(14):11-20.
- [8] 施金晓,黄文焘,邰能灵,等. 计及群控电热泵的微网联络线功 率平滑策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):201-208.
 SHI Jinxiao, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Microgrid tie-line power smoothing strategy considering group control of electric heat pumps [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):201-208.
- [9] LE K, BOYL E R, HUNTER M, et al. A procedure for coordinating direct-load-control strategies to minimize system production costs[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(6): 1843-1849.
- [10] 沈澄,徐玲玲,李文浩.相变储能材料在建筑节能领域的研究 进展[J].材料导报,2015,29(5):100-104.
 SHEN Cheng, XU Lingling, LI Wenhao. Research progress of phase change materials in energy-efficient buildings[J]. Materials Review,2015,29(5):100-104.
- [11] 张东,周剑敏,吴科如.相变储能材料的相变过程温度模型
 [J].同济大学学报(自然科学版),2006,34(7):928-932.
 ZHANG Dong,ZHOU Jianmin,WU Keru. Temperature model of phase change process of phase change material [J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2006,34(7):928-932.
- [12] 孙士苘,汪致洵,林湘宁,等. 含热电联供型光热电站与建筑相变储能的离网型综合能源系统[J]. 中国电机工程学报,2019, 39(20):5926-5937,6173.
 SUN Shitong, WANG Zhixun,LIN Xiangning, et al. Off-grid integrated energy system with combined heat and power CSP plants and phase change storage building[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(20):5926-5937,6173.
- [13] 魏繁荣,林湘宁,陈乐,等. 基于建筑相变材料储能的微网综合

能源消纳系统[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):792-804. WEI Fanrong,LIN Xiangning,CHEN Le,et al. Microgrid comprehensive energy consumption system based on phase change building materials[J]. Proceedings of the CSEE,2018, 38(3):792-804.

[14] 王海冰,王承民,张庚午,等.考虑条件风险价值的两阶段发电 调度随机规划模型和方法[J].中国电机工程学报,2016,36 (24):6838-6848,6939.

WANG Haibing, WANG Chengmin, ZHANG Gengwu, et al. Twostage stochastic generation dispatching model and method considering conditional value-at-risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24):6838-6848, 6939.

- [15] 张旭东,王吴婧,武赓,等.考虑电价不确定性的主动配电网网 损成本鲁棒优化模型[J].电力自动化设备,2017,37(9):131-138.
 ZHANG Xudong, WANG Haojing, WU Geng, et al. Robust power-loss cost optimization model considering price uncertainty for active distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):131-138.
- [16] 宁艺飞,陈星莺,谢俊,等. 实时电价下公共楼宇响应特性分析 方法[J]. 电力建设,2018,39(5):105-114.
 NING Yifei,CHEN Xingying,XIE Jun, et al. Analysis on response characteristics of public buildings under real-time price
 [J]. Electric Power Construction,2018,39(5):105-114.
- [17] SHI W B, XIE X R, CHU C C, et al. Distributed optimal energy management in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3):1137-1146.
- [18] 葛晓琳,张粒子.考虑调峰约束的风水火随机机组组合问题
 [J].电工技术学报,2014,29(10):222-230.
 GE Xiaolin, ZHANG Lizi. Wind-hydro-thermal stochastic unit

commitment problem considering the peak regulation constraints [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 222-230.

- [19] DUPACOVA J, GROEWE-KUSKA N, ROEMISCH W. Scenario reduction in stochastic programming[J]. Mathematical Programming, 2003, 95(3):493-511.
- [20] 张艺镨,艾小猛,方家琨,等.基于极限场景的两阶段含分布式 电源的配网无功优化[J].电工技术学报,2018,33(2): 380-389.
 ZHANG Yipu,AI Xiaomeng,FANG Jiakun, et al. Two-stage reac-

tive power optimization for distribution network with distributed generation based on extreme scenarios[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 380-389.

[21] ATWA Y M. Distribution system planning and reliability assessment under high DG penetration[D]. Waterloo, ON, Canada; University of Waterloo, 2010.

作者简介:



杜进桥(1988—), 男, 甘肃靖远人, 工程 师, 硕士, 研究方向为新能源规划(E-mail: jinqiaodu@qq.com);

李 艳(1971—), 女, 广东深圳人, 工程 师, 博士, 研究方向为新能源规划(E-mail: dyhust@163.com);

杜进桥

士研究生,通信作者,主要研究方向为新能 源规划(E-mail:770196877@qq.com)。

胡志豪(1995-),男,湖北武汉人,硕

(编辑 陆丹)

Economic dispatch of distribution network based on active response capability mining of phase change material energy storage system

DU Jinqiao¹, LI Yan¹, SUI Quan², LI Xuesong³, HU Zhihao², FENG Zhongnan²,

LIN Xiangning², LI Zhengtian²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to solve the problems of unqualified power supply voltage and poor power flow distribution in distribution network, a PCMTESS (Phase Change MaTerial Energy Storage System) demand response based economic dispatch strategy of distribution network is proposed. The structure and working mechanism of PCMTESS are introduced, the energy consumption law of thermal side is analyzed. The encapsulation model of thermal side considering heat dissipation and the encapsulation model of power side considering reactive power regulation capability are established. On this basis, considering the power flow distribution constraints and the output characteristics of distributed new energy, aiming at the minimum power purchase cost of distribution network, a unified dispatch model of distribution network is established considering the uncertainties of photovoltaic, wind turbine and load. The interactive iterative solution strategy is proposed to realize the efficient solution of the optimization model. Simulative results of IEEE 41-bus distribution network show that the proposed PCMTESS can optimize the power flow distribution of distribution network and improve the power quality of the power grid under the premise of maintaining room temperature comfort. The proposed dispatch model provides a new perspective for the safe and economical dispatch of distribution network and the comprehensive energy consumption.

Key words: distribution network; power flow distribution; phase change material energy storage system; active response; economic dispatch

附录 A



图 A1 相变储能墙体结构 Fig.A1 Structure of PCM based energy storage wallboard



Fig.A2 Diagram of control structure of variable frequency energy storage wallboard













图 A12 多目标下配电网的电压分布图 Fig.A12 Node voltage distribution of distribution network under multi-objective

附录 B

表 B1 实时电价

Table B1 Real-time electricity price					
时刻	实时电价/[元·(kW·h)-1]	时刻	实时电价/[元·(kW·h) ⁻¹]		
00:00	0.504	12:00	1.385		
01:00	0.347	13:00	1.677		
02:00	0.384	14:00	1.804		
03:00	0.505	15:00	2.188		
04:00	0.377	16:00	1.578		
05:00	0.573	17:00	1.167		
06:00	0.643	18:00	0.907		
07:00	0.625	19:00	0.950		
08:00	0.826	20:00	1.169		
09:00	0.740	21:00	0.941		
10:00	0.923	22:00	0.847		
11:00	1.188	23:00	0.637		

表 B2 2 种方案的经济性对比

Table B2 Economic comparison between two schemes						
方案	设备投资成本/万元	日折旧成本/万元	购电/(MW·h)	日综合成本/万元		
1	1200	0.33	43.68	3.88		
2	800	0.22	51.73	5.43		