

基于配电网分区的分布式混合储能优化方法

刘海涛^{1,2}, 许伦¹, 郝思鹏^{1,2}, 张小莲^{1,2}, 张潮¹

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 江苏 南京 211167)

摘要: 为了提高配电网对呈现不同出力特征的分布式电源的消纳能力, 实现含多种分布式电源及大负荷并涉及不同出力特征的配电网优化运行, 提出一种基于配电网分区的分布式混合储能优化方法。考虑多种分布式电源及大负荷的概率特征, 通过K-means算法得到各分布式电源及大负荷的离散化模型, 并计算离散化后配电网的电气距离矩阵, 得到配电网分区的相似矩阵; 采用吸引子传播(AP)聚类算法将配电网按照节点间的相似度大小分为多个分区, 进而确定安装混合储能系统的聚类中心节点; 考虑储能系统的充放电效率和荷电状态进行混合储能系统的容量配置, 采用希尔伯特-黄变换将各分区的不平衡功率分解为高频分量和低频分量, 分别作为功率型储能和能量型储能容量配置的参考功率, 以确定最优配置方案。算例分析结果表明, 所提优化方法可以有效提高储能的利用效率以及配置方案的经济性。

关键词: 分布式混合储能; 配电网; 离散化模型; 分区; AP聚类算法; 希尔伯特-黄变换; 容量配置

中图分类号: TM 727

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202004009

0 引言

随着分布式能源(DER)渗透率的持续提高, 其对配电系统安全经济运行的负面影响持续加剧^[1-2], 储能系统具备灵活的充放电调节和供蓄能力, 能有效缓解DER出力与负荷间的时序不匹配性^[3-4], 被视为解决大规模DER并网规划问题的重要解决方案。

针对储能系统的规划与管理, 国内外学者进行了大量的研究并取得了丰富成果。在储能系统与分布式电源配合方面, 文献[5]基于小波包分解方法获得风电功率中不符合并网标准的功率分量, 利用储能系统灵活的充放电调节能力对不符合并网标准的功率分量进行平抑, 并且将混合储能系统内部的功率分配和储能系统的年综合成本进行联合优化, 确定混合储能系统的配置方案; 文献[6]根据风电功率与计划出力的偏差, 利用离散傅里叶变换(DFT)得到功率偏差的频谱分析结果, 结合储能系统的荷电状态, 调用不同特性的储能设备对风电输出功率的不同分量进行补偿, 在极端情况下也可以保证系统安全、稳定运行。在储能系统选址定容方面, 文献[7]提出了配电网-集群-节点分层规划策略, 建立了基于集群划分的分布式光伏发电系统与储能系统的双层协调规划模型, 上层考虑经济性以确定储能的容量, 下层考虑系统运行参数以确定储能系统的位置。在储能系统管理方面, 文献[8]提出了虚拟分

区策略以及光伏电源与储能的协调规划方法, 依据历史数据, 采用密度聚类建立分时段光伏、负荷的综合状态模型, 并利用分层规划手段进行求解, 根据光伏发电、储能容量及分布进行虚拟分区管理, 提高储能系统的管理效率和配电网的自愈功能。

上述文献从不同的角度对接入配电网的储能系统进行研究, 针对DER高比例接入配电网的负面影响, 给出不同的解决方案。但是, 目前接入配电系统的DER具有容量小、数目多、位置分散的特征, 对所有DER配置储能系统, 经济成本高, 且随着DER进一步发展, 这种模式的劣势会进一步凸显, 为此, 文献[7-8]从分区角度进行思考, 文献[9-11]通过分析大量的工程及实验数据, 得出如下结论: 对于未来含高比例DER的配电网而言, 考虑控制过程的复杂度及方案的经济性, 可采用分区配置及控制方法。

综上, 本文基于已有成果^[12-13]提出一种基于配电网分区的分布式混合储能优化方法。在分区阶段, 通过K-means算法得到配电网的离散化模型, 计算离散化后配电网的电气距离矩阵, 采用吸引子传播(AP)聚类算法将配电网按照节点间的电气距离分为多个分区, 并选择聚类中心节点安装储能系统; 在容量配置阶段, 设置分区内不平衡功率的平抑目标得到平抑任务, 采用希尔伯特-黄变换将各分区的平抑任务分解为高频分量、低频分量, 分别作为配置功率型、能量型储能设备的参考功率, 同时考虑储能系统的充放电效率和荷电状态, 确定最优配置方案。

1 分布式电源及负荷的离散化模型

目前, 大多数的分区算法需有稳定的PQ节点功率作为输入量, 因而需对具有波动性特征的分布式

收稿日期: 2019-06-27; 修回日期: 2020-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607083); 2018江苏省高校重大项目(18KJA470002)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607083) and 2018 Major Projects of Colleges and Universities in Jiangsu Province(18KJA470002)

电源及负荷需求进行离散化。文献[13]采用离散概率分布表征分布式电源出力的概率特征,得到各个场景下的稳定出力,但此方法不适用于含多种分布式电源及大负荷并涉及不同概率特征的配电网出力离散化;文献[14]采用K-means算法得到了含风力发电机和大负荷的配电网在各个场景下的稳定出力。

K-means算法的基本思想^[15]为:指定类簇个数 K ,计算类簇内部数据的均值(mean value),根据相似性原则,将具有较高相似度的数据划分为同一类簇,将具有较高相异度的数据划分为不同的类簇。该方法可以使含多种分布式电源及大负荷并涉及不同概率特征的配电网的出力数据根据其类簇中心的欧氏距离进行分类-聚类,得到配电网在典型场景下的稳定出力及其概率,其主要步骤如下。

(1)指定类簇个数为 K ,并从配电网 n 个时段的数据中随机选取 K 个样本作为初始的类簇中心。

(2)根据类簇中心数据,计算配电网各个时段数据 $X_t(t=1,2,\dots,T)$ 到类簇中心数据 $Z_k(k=1,2,\dots,K)$ 的欧氏距离 $D_{t,k}$,并按照最小距离原则进行划分。

$$D_{t,k} = \sqrt{\sum_{p=1}^{p_{\text{data}}} (x_{t,p} - z_{k,p})^2} \quad (1)$$

其中, $x_{t,p}$ 、 $z_{k,p}$ 分别为数据 X_t 中的第 p 个数据和第 k 个类簇中心 Z_k 中的第 p 个数据; p_{data} 为数据维度。

(3)对已完成的每个类簇,根据式(2)计算该类簇内部所有数据的平均值 z_k ,从而完成更新类簇中心的过程。

$$z_k = \left(\sum_{x_k \in C_k} x_k \right) / N_k \quad (2)$$

其中, x_k 为 X_t 中被划分到 C_k 中的数据, C_k 为第 k 个类簇内数据的集合; N_k 为第 k 个类簇内的数据个数。

(4)重复步骤(2)和步骤(3),直至各个类簇的中心不再发生变化,并根据每个类簇内的数据个数计算该类簇中心发生的概率。

2 基于AP聚类算法的配电网分区

采用AP聚类算法对配电网进行分区的工作基础是构建配电网节点之间的相似度矩阵,相似度矩阵可由离散化后配电网各节点间的电气距离获得。

2.1 电气距离指标的定义

电气距离是用于衡量电力系统中各个节点间联系紧密程度的重要指标,通过电压灵敏度定义电气距离在许多文献中已经得到应用并取得了良好的效果^[16],而配电网关注的重点是分区后系统的电压质量,故本文采用电压-无功功率灵敏度作为定义节点间电气距离的依据。

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \partial \delta / \partial P & \partial \delta / \partial Q \\ \partial V / \partial P & \partial V / \partial Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, J 为雅可比矩阵; V 、 δ 分别为配电网中节点电压的幅值、相角; P 、 Q 分别为配电网中节点的有功功率、无功功率。

由式(3)可知,可以通过计算雅可比矩阵 J 获得节点间的电压灵敏度,文献[17]采用节点 i 、 j 的电压-无功功率灵敏度的比值计算节点 i 、 j 的电压灵敏度 β_{ij} ,计算公式如式(4)所示。

$$\beta_{ij} = (\partial V_i / \partial Q_j) / (\partial V_j / \partial Q_j) \quad (4)$$

其中, $\partial V_i / \partial Q_j$ 为节点 i 对节点 j 的电压-无功灵敏度; $\partial V_j / \partial Q_j$ 为节点 j 对自身的电压-无功灵敏度。

考虑到2个节点之间的关系不仅与其自身有关,还与网络中其他节点有关^[17],采用式(5)计算配电网中节点 i 、 j 间的电气距离 d_{ij} 。

$$d_{ij} = 1 - L_{ij} / \max \{L_{ij}\} \quad (5)$$

其中, $L_{ij} = \sqrt{\sum_{m=1}^N (\beta_{im} - \beta_{jm})^2}$, N 为配电网中的节点数。

2.2 电气距离期望矩阵的计算

假设采用K-means算法对分布式电源及负荷需求进行离散化,离散区间 k 出现的概率为 $p(k)$,该区间下配电网节点间的电气距离矩阵为 $D(k)$,如式(6)所示。考虑各个区间出现的概率后,配电网的电气距离期望矩阵 E 如式(7)所示。

$$D(k) = \begin{bmatrix} d_{11}(k) & d_{12}(k) & \cdots & d_{1N}(k) \\ d_{21}(k) & d_{22}(k) & \cdots & d_{2N}(k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{N1}(k) & d_{N2}(k) & \cdots & d_{NN}(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$E = \sum_{k=1}^K D(k) p(k) \quad (7)$$

其中, $d_{ij}(k)$ 为离散区间 k 下节点 i 、 j 间的电气距离。

2.3 基于AP聚类算法的配电网分区

利用AP聚类算法将 E 中各个元素取反构建相似度矩阵 S ,偏向参数 l 取为 S 中元素的中值,以 S 作为输入,通过比较各个节点的支持度 R 和适应度 A ,确定聚类中心,其计算过程见式(8)和式(9)。

$$R(i, k) = S(i, k) - \max_{k_1 \neq k} \{A(i, k_1) + S(i, k_1)\} \quad (8)$$

$$A(i, k) = \min \left\{ 0, R(k, k) + \sum_{i_1 \in (i, k)} \max \{0, R(i_1, k)\} \right\} \quad (9)$$

其中, $R(i, k)$ 为节点 i 支持节点 k 成为其聚类中心的支持度,其值越大,则节点 k 成为聚类中心的可能性越高; $S(i, k)$ 、 $S(i, k_1)$ 分别为矩阵 S 中第 i 行第 k 列和第 i 行第 k_1 列元素; $A(i, k)$ 为节点 k 自身适合成为聚类中心的适应度,其值越大,则节点 k 成为节点 i 的聚类中心的可能性越高。

基于AP聚类算法的配电网分区过程主要分为含多种分布式电源及波动负荷的离散化过程、配电网电气距离期望矩阵的计算过程、基于AP聚类算法

的分区过程。具体流程如图1所示。

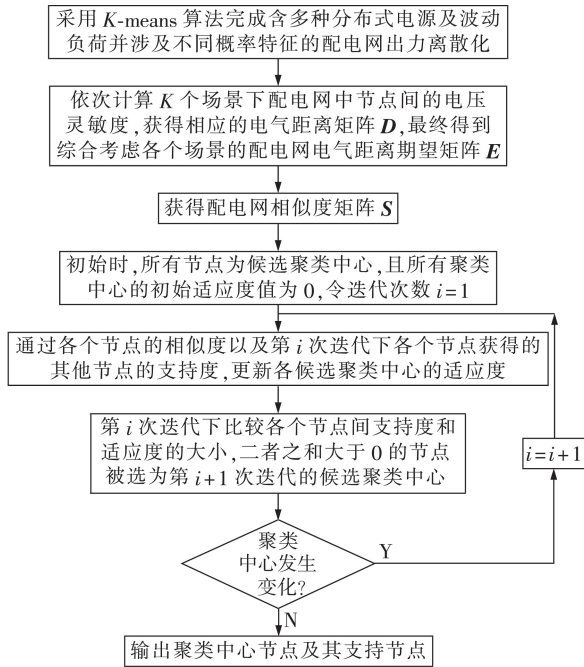


图1 基于AP聚类算法的配电网分区流程

Fig.1 Distribution network partitioning process based on AP clustering algorithm

3 基于希尔伯特-黄变换的功率平抑任务分解

在配电网中配置储能的目的是促进可再生能源的就地消纳,使得配电网相对于主电网在某些时段内是稳定的负荷或电源,因此本文通过设置不平衡功率的平抑目标 P_{set} 得到平抑目标和储能加入前不平衡功率 P_{before} 之间的差值,即平抑任务 P_{task} ,通过希尔伯特-黄变换将配电网各分区的平抑任务分解为几种具有不同特征时间尺度的固有模态函数(IMF),并得到各固有模态函数曲线的瞬时频率-时间曲线;最终通过最优分界频率将各分区的不平衡功率划分为低频分量和高频分量^[17],分别利用能量型储能和功率型储能进行平抑。

3.1 平抑目标的设置

由于不平衡功率在最小值 P_{min} 和最大值 P_{max} 之间波动,可以通过设置平抑区间将不平衡功率区间 $[P_{\text{min}}, P_{\text{max}}]$ 划分为 h 个平抑区间,令输出功率平抑步长为 $P_{\text{step}} = (P_{\text{max}} - P_{\text{min}})/h$,则第 i 个平抑区间为 $[P_{\text{min}} + iP_{\text{step}}, P_{\text{min}} + (i+1)P_{\text{step}}]$,该区间内不平衡功率平抑目标 P_{set_i} 的计算公式为:

$$P_{\text{set}_i} = P_{\text{min}} + [(2i-1)/2] P_{\text{step}} \quad (10)$$

则分区 d 的平抑目标 P_{set_Dd} 可以视为分区 d 中各个平抑区间平抑目标值之和。故配电网各分区的平抑任务可以表示为:

$$P_{\text{task}_Dd} = P_{\text{set}_Dd} - P_{\text{before}_Dd} \quad (11)$$

其中, P_{task_Dd} 为分区 d 的平抑任务; P_{before_Dd} 为储能加入前分区 d 的不平衡功率,如式(12)所示。

$$P_{\text{before}_Dd} = P_{d_{\Sigma \text{DG}}} - P_{d_{\Sigma \text{load}}} \quad (12)$$

其中, $P_{d_{\Sigma \text{DG}}}$ 、 $P_{d_{\Sigma \text{load}}}$ 分别为配电网分区 d 内所有分布式电源有功出力 and 负荷有功需求。

3.2 变分模态分解

本文采用变分模态分解(EMD)将平抑任务分解为一系列固有模态函数 c_i ,具体步骤如下。

(1)采用三次样条函数对初始不平衡功率 $P(t)$ 进行插值,得到其上包络线以及下包络线,计算二者的均值 $m_1(t)$ 。

(2)采用式(13)计算候选模态函数序列 $S_{\text{IMF1}}(t)$ 。

$$S_{\text{IMF1}}(t) = P(t) - m_1(t) \quad (13)$$

(3)判断 $S_{\text{IMF1}}(t)$ 是否满足由局部最大值点拟合得到的上包络线和局部最小值点拟合得到的下包络线均值为0,如果不满足,则将 $S_{\text{IMF1}}(t)$ 视为新的 $P(t)$,重复步骤(1)和步骤(2),直至满足条件得到模态函数序列。

(4)从不平衡功率 $P(t)$ 中去除分量 $S_{\text{IMF1}}(t)$ 得到余项 $r(t)$,计算公式如下:

$$r(t) = P(t) - S_{\text{IMF1}}(t) \quad (14)$$

(5)将 $r(t)$ 视为新的 $P(t)$,重复步骤(1)~(4),直至 $r(t)$ 无法再分离模态函数序列。

此时,各固有模态函数 $S_{\text{IMFi}}(t)$ 和余项 $r(t)$ 满足:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{IMF}}} S_{\text{IMFi}}(t) + r(t) \quad (15)$$

其中, N_{IMF} 为固有模态函数个数。

3.3 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换通过将初始信号与 $1/(\pi t)$ 做卷积,得到对应的全通移相网络,以观察信号的瞬时频率、瞬时幅值和瞬时相位^[18]。其过程如式(16)所示。

$$H(c(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} c(\tau) \frac{1}{t - \tau} d\tau \quad (16)$$

其中, $H(c(t))$ 为固有模态函数 $c(t)$ 经希尔伯特-黄变换后得到的函数。

同时,信号 $c(t)$ 可以表示为:

$$c(t) = a(t) \cos \phi(t) \quad (17)$$

其中, $a(t)$ 为信号幅值; $\phi(t)$ 为瞬时相位。

瞬时频率 $f(t)$ 可以采用式(18)计算得到。

$$f(t) = d\phi(t)/dt \quad (18)$$

由于 $a(t)$ 与 $f(t)$ 都是关于时间的函数,因此可以将 $c(t)$ 表示在频率-时间坐标系中。

依据各个模态函数的瞬时频率-时间曲线混合重叠部分最少为原则,确定最优分界频率,将平抑任务分为高频以及低频分量,其计算过程如下:

$$P_h(t) = \sum_{i=1}^g c_i(t) \quad (19)$$

$$P_d(t) = \sum_{i=g+1}^{N_{IMF}} c_i(t) + r(t) \quad (20)$$

其中, $P_h(t)$ 为高频功率分量; $P_d(t)$ 为低频功率分量; g 为最优分界频率。

4 混合储能配置

文献[19]将满足储能系统荷电状态约束的最小配置容量作为最优配置容量, 本文参考这一思路, 并以各分区平抑任务的低频分量、高频分量作为参考功率, 分别配置能量型储能和功率型储能设备的容量。

4.1 额定功率配置

能量型储能设备的额定功率 $P_{et, rated}$ 配置为:

$$P_{et, rated} = \max \left\{ \left| \max_{t=1,2,\dots,T} \{P_d(t)\} \right| \eta_1 \eta_2, \frac{\min_{t=1,2,\dots,T} \{P_d(t)\}}{\eta_1 \eta_2} \right\} \quad (21)$$

其中, η_1 、 η_2 分别为能量型储能设备的充放电效率和配套换流器的能量转换效率。

功率型储能设备额定功率计算过程与能量型储能设备额定功率计算过程一致。

4.2 额定容量配置

计及储能设备充放电效率及配套换流器能量转换效率后, 能量型储能设备充放电功率为:

$$P_{et,n} = \begin{cases} P_d(t) \eta_1 \eta_2 & P_d(t) > 0 \\ P_h(t) / (\eta_1 \eta_2) & P_d(t) \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

能量型储能设备的初始荷电状态 SOC_0 可由其充放电效率进行计算, 计算公式如下:

$$SOC_0 = \left(\max_{t=1,2,\dots,T} \left\{ \int_0^{k\Delta T} P_{et,n}(t) dt \right\} SOC_{min} - \min_{t=1,2,\dots,T} \left\{ \int_0^{k\Delta T} P_{et,n}(t) dt \right\} SOC_{max} \right) \div \left(\max_{t=1,2,\dots,T} \left\{ \int_0^{k\Delta T} P_{et,n}(t) dt \right\} - \min_{t=1,2,\dots,T} \left\{ \int_0^{k\Delta T} P_{et,n}(t) dt \right\} \right) \quad (23)$$

其中, ΔT 为充放电时间间隔; SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为能量型储能设备荷电状态的上、下限。

能量型储能设备额定容量 $E_{et, rated}$ 见式(24)。

$$E_{et, rated} = \min \left\{ \max \left\{ \frac{\max_{t=1,2,\dots,T} \left\{ \int_0^{k\Delta T} P_{et,n}(t) dt \right\}}{SOC_{max} - SOC_0}, \frac{\min_{t=1,2,\dots,T} \left\{ \int_0^{k\Delta T} P_{et,n}(t) dt \right\}}{SOC_{min} - SOC_0} \right\} \right\} \quad (24)$$

其 k 时刻的荷电状态由式(25)计算得到。

$$SOC_k = SOC_0 + \int_0^{k\Delta T} P_{et,n}(t) dt / E_{et, rated} \quad (25)$$

k 时刻的荷电状态必须在 $[SOC_{min}, SOC_{max}]$ 范围内, 否则需要提高 $E_{et, rated}$ 。

功率型储能设备额定容量的计算过程与能量型储能设备的计算过程一样。

5 算例分析

本文在 IEEE 33 节点配电系统的基础上, 通过接入光伏电站、风电场及相关波动负荷, 构成含多种分布式电源及大负荷并涉及不同概率特征的配电系统, 相关拓扑图见附录中图 A1; 分布式电源、大负荷的概率特征选取广州市某商住区数据^[20]进行分析。

5.1 算例模型的建立

由于在一年四季中分布式电源出力和大负荷特征差异巨大, 而储能系统需要全年不间断地运行, 为了避免配置结果以偏概全, 造成储能容量不足或浪费, 本文将全年划分为冬季典型日(1—3、12月)、过渡季典型日(4、5、10、11月)和夏季典型日(6—9月), 并将每个典型日划分为 24 个时段, 每个时段持续 1 h^[20], 相关分布式电源出力曲线以及波动负荷需求曲线分别见附录中图 A2 和图 A3。

在分区阶段的电气距离期望矩阵的计算过程以及最后的配置结果中, 均采用夏季、过渡季和冬季典型日计算结果的加权和, 权值均为 1/3。

5.2 配电网分区结果分析

以夏季典型日为例进行分析, 原始数据为分布式电源与负荷在各个时段的功率, 由于原始数据维度仅为 24, 故聚类个数设置为 5 已足够反映分布式电源及负荷的特征, 通过 K-means 算法得到 5 个离散化区间内分布式电源出力及负荷需求以及 5 个离散化区间出现的概率, 结果如图 2 所示。

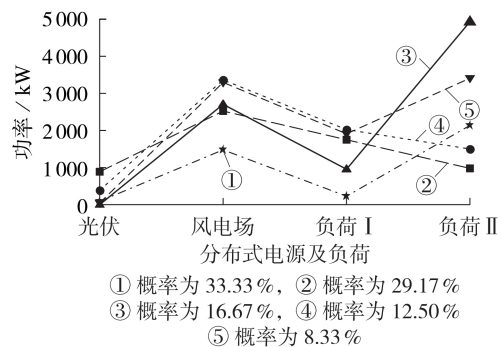


图2 离散化结果及其概率

Fig.2 Discretization results and their probabilities

计算冬季、过渡季、夏季 3 种情况下的电压-无功功率灵敏度得到加权后的配电网节点电气距离期望矩阵, 利用 AP 聚类算法依据电气距离期望矩阵进行分区, 结果见图 3, 相关分区数据见附录中表 A1。

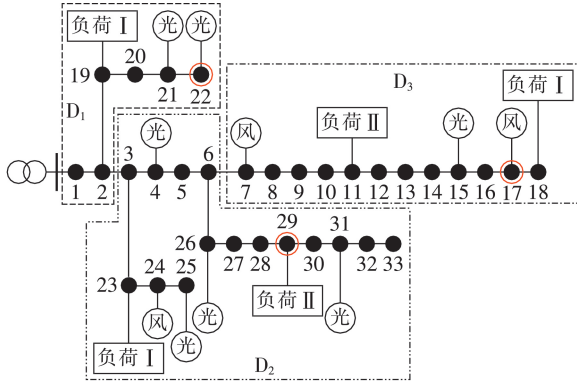


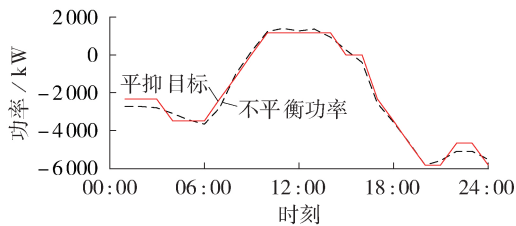
图3 基于AP聚类算法的分区结果

Fig.3 Partition result based on AP clustering algorithm

由图3可以看出,物理意义上各个分区都是连通的,各分区内部节点是互相连通的,分区结果中未出现不相邻的节点聚合成区的不合理情况。

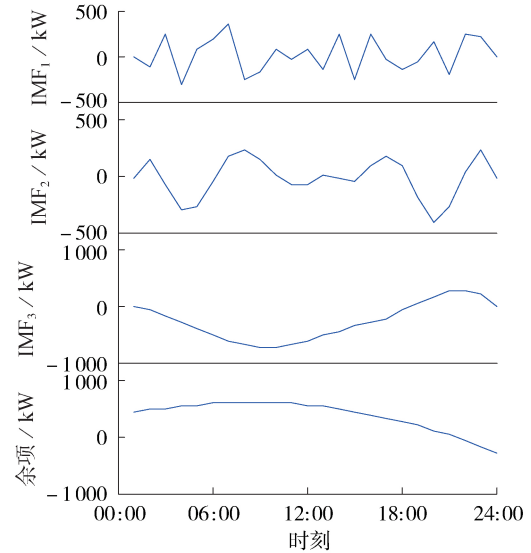
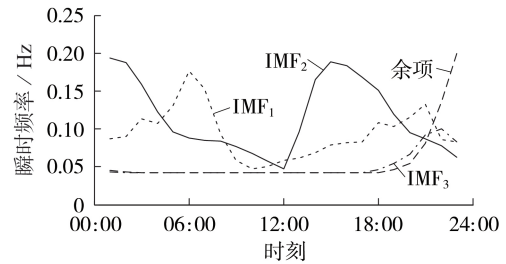
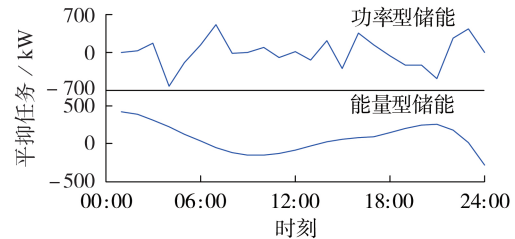
5.3 储能配置结果分析

以分区 D_2 夏季典型日为例,进行储能配置分析,依据 D_2 内不平衡功率的波动情况,设置平抑区间个数,构建平抑目标从而得到平抑任务。显然,平抑区间个数的选择对储能配置结果有显著的影响,若平抑区间数目设置得过少,则平抑后的输出曲线与实际曲线相差过大,储能容量需求大,配置成本高;若平抑区间数目设置得过多,这样虽可减少储能的配置容量,但会显著增加配电网与主网联络线上的功率波动。综合考虑以上2点,且已有文献证明,随着区间数目的增大,平抑后的结果与实际输出曲线的差值变化趋势逐渐减缓^[21],故本文设置平抑区间数目为6,分区 D_2 的平抑目标及不平衡功率见图4。

图4 分区 D_2 的平抑目标和不平衡功率Fig.4 Smoothing goal and unbalanced power of Area D_2

通过希尔伯特-黄变换分解平抑任务,得到各固有模态函数分量及对应的瞬时频率-时间曲线,结果分别见图5和图6。以各固有模态函数的瞬时频率-时间曲线混合重叠部分最少为原则,确定 IMF_1 、 IMF_2 为高频分量, IMF_3 和余项为低频分量,分别采用功率型、能量型储能设备进行补偿,结果见图7。

为了提高储能系统的寿命、经济性,参考附录中表A2所示相关数据,假设功率型、能量型储能设备的充放电时间分别为1、5 h,采用本文所提混合储能配置模型分别对能量型储能设备和功率型储能设备

图5 分区 D_2 平抑任务的分解结果Fig.5 Decomposition results of smoothing task in Area D_2 图6 分区 D_2 固有模态函数的瞬时频率-时间曲线Fig.6 Instantaneous frequency-time curves of IMFs in Area D_2 图7 分区 D_2 储能装置承担的平抑任务Fig.7 Smoothing task of energy storage device in Area D_2

的配置方案进行优化,并与在不考虑分区的情况下构建平抑目标,在每个分布式电源处安装混合储能的配置方案结果进行对比,结果分别见表1和表2。

由表1和表2可知,与在每个分布式电源处都安装储能的传统方法相比,本文所提基于配电网分区的分布式混合储能优化方法的优越性体现在:①本文利用分区内各种不同概率特征的分布式电源及负荷的互补性,分区配置储能所需的容量明显减小,配置方案的经济性显著提高;②传统方法只在电源处配置储能,忽略了负荷的波动性,使得配电网与主网

表1 考虑配电网分区时的储能配置结果

Table 1 Configuration results of energy storage with considering distribution network partition

分区	储能类型	额定功率/kW	额定容量/(kW·h)
D ₁	功率型	250	383
	能量型	103	745
D ₂	功率型	455	687
	能量型	194	1541
D ₃	功率型	474	657
	能量型	247	1901
储能容量配置	功率型	—	1727
总和/(kW·h)	能量型	—	4187

表2 不考虑配电网分区时的储能配置结果

Table 2 Energy storage configuration results without considering distribution network partition

配置对象	储能类型	额定功率/kW	额定容量/(kW·h)
7座光伏电站	功率型	99	146×7
	能量型	74	419×7
3座风电场	功率型	406	698×3
	能量型	292	1846×3
储能容量配置	功率型	—	3116
总和/(kW·h)	能量型	—	8471

联络线上的功率仍频繁波动。

6 结论

为了保证配电网稳定运行的基础上,提高配电网中储能配置的经济性,本文提出一种基于配电网分区的分布式混合储能优化方法。在分区阶段,根据各分布式电源及大负荷的概率分布特征,采用K-means算法获得各个离散化区间下分布式电源出力及负荷需求以及各个区间出现的概率,从而得到配电网各节点间的电气距离期望矩阵,将其作为配电网分区的相似矩阵,采用AP聚类算法将配电网按照节点间的相似度大小分为多个分区,并选择聚类中心节点安装储能系统;在容量配置阶段,通过设置分区内不平衡功率的平抑目标得到平抑目标和储能加入前不平衡功率之间的差值,即平抑任务,采用希尔伯特-黄变换将各分区的平抑任务分解为高频分量和低频分量,分别作为配置功率型储能设备和能量型储能设备的参考功率,考虑储能系统的荷电状态与充放电效率,分别配置功率型、能量型储能设备的容量。算例分析结果表明,与在每个分布式电源处都安装储能的传统方法相比,本文所提基于配电网分区的分布式混合储能优化方法可以有效提高储能的利用效率以及配置方案的经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 陈厚合,杜欢欢,张儒峰,等.考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J].电力自动化设备,2018,38(8):174-182,188.

CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182, 188.

[2] GILL S, KOCKAR I, AULT G. Dynamic optimal power flow for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 121-131.

[3] 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.

[4] XIAO J, BAI L Q, LU Z G, et al. Method, implementation and application of energy storage system designing[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014, 24(3): 378-394.

[5] TRUNG T, AHN S J, CHOI J H, et al. Real-time wavelet-based coordinated control of hybrid energy storage systems for denoising and flattening wind power output[J]. Energies, 2014, 7(10): 6620-6644.

[6] 李滨,栗祎敏,莫新梅,等.跟踪风电计划偏差的风储系统联合控制策略[J].电网技术,2019,43(6):2102-2108.

LI Bin, SU Yimin, MO Xinmei, et al. Control strategy of hybrid wind-ES power system for tracking wind power planning deviation[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2102-2108.

[7] 丁明,方慧,毕锐,等.基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2187-2201.

DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201.

[8] 白牧可,唐巍,谭煌,等.基于虚拟分区调度和二层规划的城市配电网光伏-储能优化配置[J].电力自动化设备,2016,36(5):141-148.

BAI Muke, TANG Wei, TAN Huang, et al. Optimal PV-generation & ES configuration based on virtual partition scheduling and bi-level programming for urban distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 141-148.

[9] 郑乐,胡伟,陆秋瑜,等.储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2533-2543.

ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543.

[10] ZHAO B, XU Z C, XU C, et al. Network partition-based zonal voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4087-4098.

[11] NICK M, CHERKAoui R, PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2300-2310.

[12] 靳雯皓,刘继春,刘俊勇.基于复合储能系统的微网联络线功率优化[J].电力自动化设备,2018,38(6):22-28,33.

JIN Wenhao, LIU Jichun, LIU Junyong. Microgrid tie line power optimization based on hybrid energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 22-28, 33.

- [13] 周琼, 俞志皓, 丰颖, 等. 风电接入下基于AP聚类的无功功率-电压控制分区方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 19-27, 158.
ZHOU Qiong, YUN Zhihao, FENG Ying, et al. Reactive power-voltage control partitioning of wind power integration system based on affinity propagation clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 19-27, 158.
- [14] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.
WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 152-159.
- [15] SANGALLI L M, SECCHI P, VANTINI S, et al. mean alignment for curve clustering[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2010, 54(5): 1219-1233.
- [16] FANG G J, BAO H. A calculation method of electric distance and subarea division application based on transmission impedance[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 104: 012006.
- [17] MISHRA M, SAHANI M, ROUT P K. An islanding detection algorithm for distributed generation based on Hilbert-Huang transform and extreme learning machine[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2017, 9: 13-26.
- [18] 黄传金, 周铜. 基于变分模式分解的电能质量扰动检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 116-123.
HUANG Chuanjin, ZHOU Tong. A new detection method of power quality disturbance based on VMD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 116-123.
- [19] 葛乐, 袁晓冬, 王亮, 等. 面向配电网优化运行的混合储能容量配置[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3506-3513.
GE Le, YUAN Xiaodong, WANG Liang, et al. Capacity configuration of hybrid energy storage system for distribution network optimal operation[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3506-3513.
- [20] 杨允. 区域型分布式供能系统优化配置研究及不确定性优化探索[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016.
YANG Yun. Research on optimal design of district-scale CCHP systems and exploration on optimal design under uncertainty[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Engineering Thermophysics), 2016.
- [21] 崔杨, 曲钰, 仲悟之, 等. 基于改进Shapley值的风电汇聚趋势性分状态量化方法[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2094-2102.
CUI Yang, QU Yu, ZHONG Wuzhi, et al. Research on sub-state quantization method of wind convergence trend based on improved shapley value[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2094-2102.

作者简介:



刘海涛

刘海涛(1972—),女,湖北宜昌人,教授,博士,研究方向为微电网运行与控制关键技术(E-mail: 13851424346@163.com);

许伦(1993—),男,江苏镇江人,硕士研究生,研究方向为主动配电网网络分析与运行调控(E-mail: 2694909131@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Optimization method of distributed hybrid energy storage based on distribution network partition

LIU Haitao^{1,2}, XU Lun¹, HAO Sipeng^{1,2}, ZHANG Xiaolian^{1,2}, ZHANG Chao¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to improve the absorption capacity of distribution network to DGs (Distributed Generations) with different output characteristics and realize the optimal operation of distribution network with multiple DGs and large loads involving different output characteristics, an optimization method of distributed hybrid energy storage based on distribution network partition is proposed. Considering the probabilistic characteristics of multiple DGs and large loads, the discretization models of DGs and large loads are obtained by using K-means algorithm, and the electrical distance matrix of distribution network after discretization is calculated to obtain the similar matrix of distribution network partition. The distribution network is divided into multiple partitions according to the similarity between nodes by using the AP (Attractor Propagation) clustering algorithm, and then the clustering center nodes for installing the hybrid energy storage system are determined. Considering the charging/discharging efficiency and state-of-charge of energy storage system, the capacity configuration of the hybrid energy storage system is carried out. The unbalanced power of each partition is decomposed into high frequency component and low frequency component by Hilbert-Huang transform, which are respectively used as the reference power of capacity configuration for power-type and energy-type energy storage, so as to determine the optimal configuration scheme. The example results show that the proposed optimization method can effectively improve the utilization efficiency of energy storage and the economy of configuration scheme.

Key words: distributed hybrid energy storage; distribution network; discretization model; partition; AP clustering algorithm; Hilbert-Huang transform; capacity configuration

附录

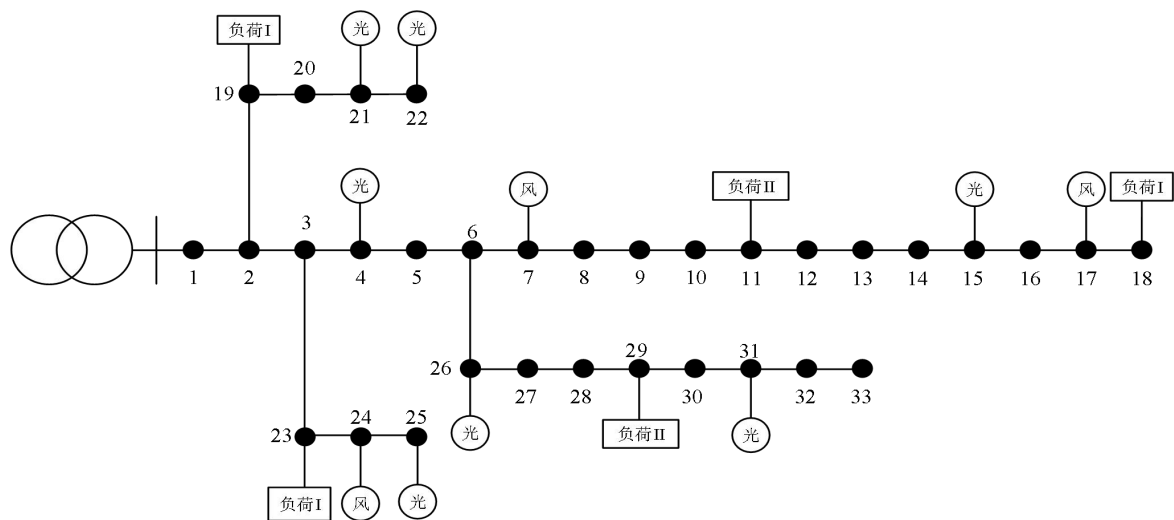


图 A1 IEEE 33 节点配电系统示意图

Fig.A1 Schematic diagram of IEEE 33-bus distribution system

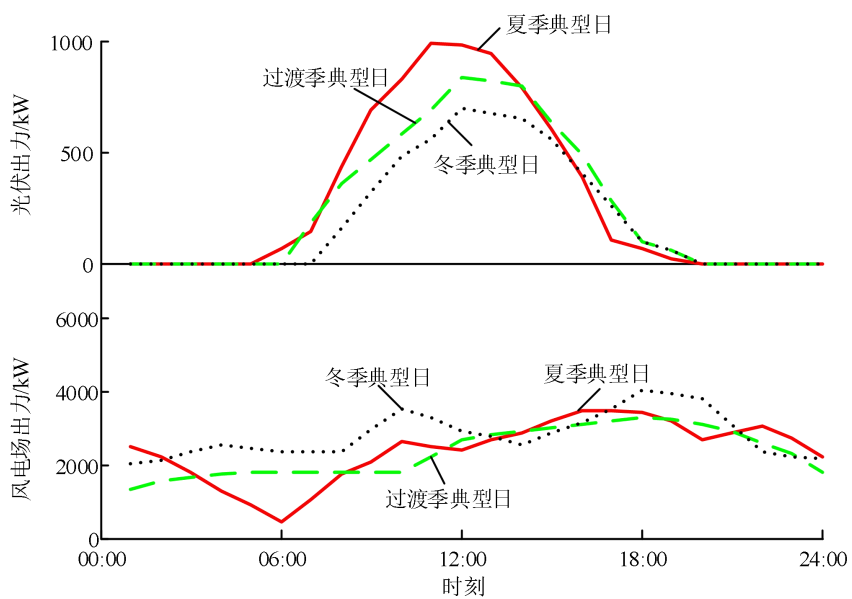


图 A2 分布式电源出力曲线

Fig.A2 Output curves of distributed generator

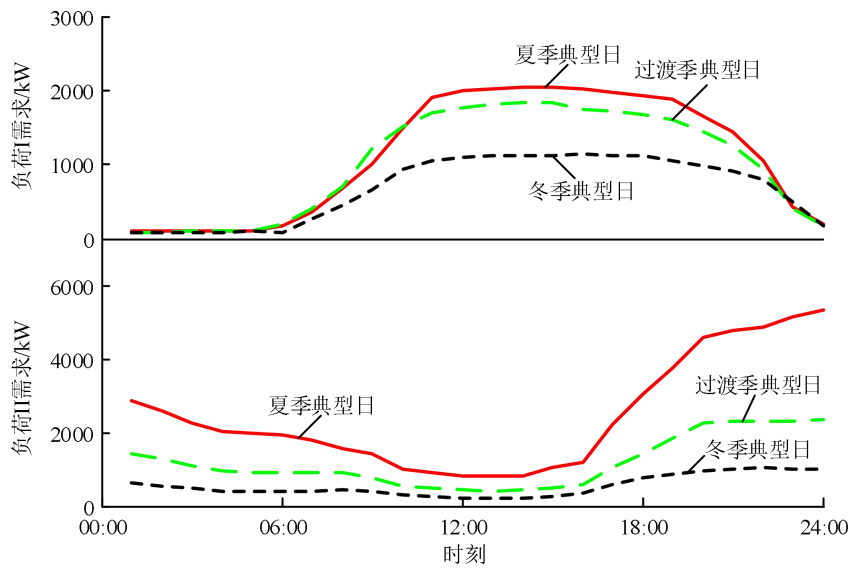


图 A3 负荷需求曲线

Fig.A3 Load demand curves

表 A1 聚类中心节点及其支持节点

Table A1 Clustering center node and its supporting nodes

分区	聚类中心节点	支持节点
D ₁	22	1, 2, 19—21
D ₂	29	3—6, 23—33
D ₃	17	7—12 13—18

表 A2 储能系统参数

Table A2 Parameters of energy storage system

参数	数值	
	能量型储能设备	功率型储能设备
充放电效率	0.90	0.95
换流器能量转换效率	0.95×0.95	0.95×0.95
荷电状态上下限	[0.15, 0.85]	[0.10, 0.90]