

分布式储能系统接入配电网的容量配置和有序布点综合优化方法

贾雨龙¹, 米增强¹, 刘力卿², 尹渠凯¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 国网天津市电力有限公司电力科学研究院, 天津 300092)

摘要:随着电储能技术经济性的不断提升,在配电网中大量接入分布式储能系统(DESS)已成为一个发展趋势。针对 DESS 有序接入中面临的规划与运行问题,提出了一种 DESS 的容量配置和有序布点的综合优化方法:上层模型为考虑 DESS 投资效益和减缓配电网增容的容量配置模型;下层模型为考虑 DESS 特性和容量限制、调节负荷削峰填谷且平抑波动的布点优化模型。以 IEEE 33 节点系统为例,对所提优化模型与方法的有效性进行了验证,并在此基础上得出了 DESS 在配电网中的布局方案。仿真结果表明,所提综合优化方法可适用于不同配置容量、不同布点数量 DESS 接入的应用场景,能为大量 DESS 接入配电网的规划与审核提供技术支持。

关键词:分布式储能系统;配电网;有序布点;综合优化模型;布局方案;容量配置

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.001

0 引言

在“安全、高效、低碳”能源发展战略的背景下,配电网将规模化接入分布式能源 DER (Distributed Energy Resource)^[1-2]和分布式储能系统 DESS (Distributed Energy Storage System)^[3]等资源。其中 DESS 是一种容量较小、具有分散性和“源-荷”特性的可调控资源,其具有高效率 and 快速响应的特点,能为维持电力系统供需的安全性以及可靠性提供有力的支撑^[4-6]。但是,由于 DER 和 DESS 等新兴资源的接入,使单一潮流流向的传统配电网变为双向潮流的有源配电网,其中 DER 相当于具有随机性的扰动电源,对配电网的安全运行将会产生负面的影响,另外,随着城市快速发展和产业升级,配电网中的现有设备以及线路已经无法满足日益增加的用电负荷需求,如何在配电网中有序接入和优化布局 DESS,有效延缓配电网的规划升级改造以及提高配电网的承载能力,是未来配电网能够高效运行亟待解决的问题。

目前国内外学者对储能技术在电力系统中优化配置方面的研究主要集中于大型储能系统 ESS (Energy Storage System) 在可再生能源聚集地和微电网中的优化配置。文献[7]提出一种用于提高风电接入的 ESS 规划/运行综合优化模型,用以平滑可再生能源的出力特性,提高其外送能力;文献[8-10]提出基于 ESS 平滑微电网联络线功率波动及优化联络线功

率的容量优化方法,满足其优化运行,并利用遗传算法进行求解。而现有关于 DESS 优化配置方面的研究则较少,其中,文献[11]从 DESS 的运营机制和辅助服务角度出发,提出一种将其应用在输电网中的优化集成策略;文献[12]提出一种考虑长期经济规划及短期优化运行的接入集中式 ESS 和 DESS 的主动配电网多层规划模型;文献[13]从最优化配电网的运行收益的角度出发,研究了 DESS 的布点选取对配电网的影响机理;文献[14-15]考虑 ESS 与 DER 建立了规划和运行联合优化模型,研究其参与虚拟电厂和主动配电网的优化配置问题。上述文献在容量配置方面的应用场景大多集中于辅助新能源的消纳和参与微网的协同运行中,其研究对象均为单体、容量较大的 ESS,配置方案不适用于 DESS 分布式、多点布局的需求;在优化布点方面,DESS 的布点位置是已知指定的,并未提出 DESS 布点的位置选取依据、模型算法及求解方法。

针对上述问题,本文提出一种 DESS 在配电网中的容量配置和优化布点综合优化方法。首先,构建 DESS 的双层优化框架,将长期规划和短期优化运行相结合,前者考虑 DESS 长期规划的经济性,后者考虑 DESS 在运行中的高效性;然后,分别建立双层优化模型,并对线性规划(LP)模型和混合整数非线性规划(MINLP)模型进行综合求解;最后,通过 IEEE 33 节点系统验证本文所提模型的可行性。本文将 DESS 的优化布点放在短期运行周期内考虑,这样虽然增加了优化规划的维度,但能使优化配置问题更加全面和贴近实际运行。

1 DESS 双层优化框架

本文考虑 DESS 在规划周期内容量配置的经济

收稿日期:2018-05-04;修回日期:2018-12-25

基金项目:国家电网公司科技项目(KJGW2018-014);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018QN075)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(KJGW2018-014) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018QN075)

性和运行周期内布点优化的高效性,提出了 DESS 容量配置与布点优化的综合优化框架,如图 1 所示,其优化思路为:上层容量配置优化模型负责求解 DESS 的规划问题,主要包括 DESS 总容量配置和最优规划投资,为下层模型提供 DESS 的容量和功率约束;下层布点优化模型根据 DESS 接入配电网后的运行目标和约束条件,求解 DESS 的布点数量、位置和单体容量配置,为上层模型求取准确的投资成本提供判别依据,最终形成考虑长期经济性和短期运行高效性的综合优化配置方案。

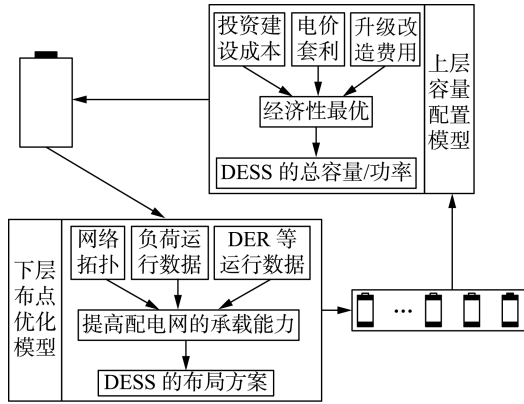


图 1 DESS 容量配置与布点优化的综合优化框架

Fig.1 Comprehensive optimization framework of capacity configuration and point selection for DESS

1.1 规划层面

在规划层面中求解 DESS 接入配电网后的最优容量配置成本,由于在长时间尺度内无法考虑其在运行周期内的安全约束和配电网的网络拓扑,仅能求解得到 DESS 的总能量容量和总功率水平配置,无法得到具体的布点数量和布点位置,使得 DESS 的规划设计方案不够全面。针对上述问题,本文提出下层布点优化模型,在短时间运行层面上,结合具有代表性时间周期的配电网负荷运行数据、运行目标和约束条件,求取 DESS 的布点数量、布点位置和单体容量配置,从而指导规划设计 DESS 的优化配置方案。容量配置模型从配电网公司角度出发,使配电网中 DESS 安装、运营和维护的综合成本最小。因此,从以下 3 个方面衡量其经济最优:①投资建设成本,包括 DESS 的投资成本、安装成本以及维护成本,本文将上述成本归算到 DESS 的单位能量容量以及功率水平费用中;②电价套利,DESS 安装在配电网中,利用其双向可主动调控的特性,通过分时电价的价格差进行电价套利,以补偿其投资建设成本;③电网升级改造,随着配电网负荷需求的增长,需对指定线路和设备进行维护和扩容,合理配置 DESS 的容量可延缓其投资建设的时间点,从而节省改造及维护费用。结合上述 3 个经济成本因素,求解在规划周期内合理配置 DESS 的总能量容量及功率水

平,为下层布点优化模型提供多个 DESS 的总功率水平和功率水平的上限约束。

1.2 运行层面

本文选取接入 DESS 后配电网的负荷方差最小为目标,高效利用 DESS 的配置容量参与负荷调控,在安全约束下提高配电网的弹性,实现调峰填谷及平抑负荷波动的优化作用^[16-17]。DESS 接入配电网后,将使配电网有一定的可调节潜力,可为消纳远端可再生能源和就地分布式电源等实际应用场景提供辅助调控策略。布点优化模型以典型日场景的用电负荷、接入 DER 的数据为支撑,代表配电网运行阶段的日常运行场景;以电压限制约束、静态安全约束、DER 功率约束和 DESS 容量/功率限制为约束条件,求解 DESS 的布点数量、位置和容量配置。其中 DESS 过充和过放会导致 DESS 的循环使用寿命大幅度缩减,而不同的 DESS 有不同的最优优化区间。根据国家可再生能源实验室 NREL (National Renewable Energy Laboratory) 电池研究院的研究表明,一般化学电池的优化区间为:电池的荷电状态在 15% ~ 85% 之间,如图 2 所示。

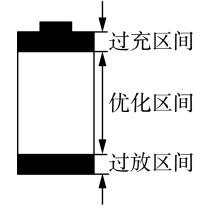


图 2 DESS 的优化区间

Fig.2 Optimized interval of DESS

将 DESS 的运行区间限制在优化区间内,可有效提高电池的循环次数及使用寿命,本文只针对 DESS 的容量限制进行研究,忽略 DESS 在使用过程中的能量衰减,则 DESS 的模型为:

$$E^{\text{DESS}}(t+1) = E^{\text{DESS}}(t) + \sum_{\tau=1}^{\Delta t} P_{\text{ch/dis}}^{\text{DESS}}(\tau) \Delta t \quad (1)$$

$$P_{\text{ch/dis}}^{\text{DESS}}(t) = \begin{cases} P_{\text{ch}}^{\text{DESS}}(t) & \text{功率大于 0} \\ P_{\text{dis}}^{\text{DESS}}(t) & \text{功率小于 0} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{\text{SOC}}^{\text{DESS}}(t) = S_{\text{SOC}}^{\text{DESS}}(0) + E^{\text{DESS}}(t) / E_{\text{act}}^{\text{DESS}}(t) \quad (3)$$

其中, $E^{\text{DESS}}(t)$ 为 t 时刻 DESS 的储能容量; $E^{\text{DESS}}(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻 DESS 的储能容量; $P_{\text{ch/dis}}^{\text{DESS}}(t)$ 为 t 时刻 DESS 的输入/输出功率,其数值为正时为输入功率 $P_{\text{ch}}^{\text{DESS}}(t)$,数值为负时为输出功率 $P_{\text{dis}}^{\text{DESS}}(t)$; Δt 为运行时间段; $S_{\text{SOC}}^{\text{DESS}}(t)$ 为 t 时刻 DESS 荷电状态; $S_{\text{SOC}}^{\text{DESS}}(0)$ 为 DESS 的初始荷电状态; $E_{\text{act}}^{\text{DESS}}(t)$ 为 t 时刻 DESS 的额定容量。

DESS 在运行过程中的输入/输出功率和荷电状态满足如下约束:

$$0 < P_{\text{ch}}^{\text{DESS}}(t) < P_{\text{ch}}^{\text{DESS}, \max} \quad (4)$$

$$0 < P_{\text{dis}}^{\text{DESS}}(t) < P_{\text{dis}}^{\text{DESS}, \max} \quad (5)$$

$$S_{\text{SOC}}^{\text{DESS}, \min} \leq S_{\text{SOC}}^{\text{DESS}}(t) \leq S_{\text{SOC}}^{\text{DESS}, \max} \quad (6)$$

其中, $P_{ch}^{DESS, \max}$ 和 $P_{dis}^{DESS, \max}$ 分别为 DESS 的输入和输出功率上限; $S_{SOC}^{DESS, \max}$ 和 $S_{SOC}^{DESS, \min}$ 分别为 DESS 荷电状态的上、下限。

2 容量配置和布点优化的综合优化方法

2.1 容量配置模型

本文考虑 DESS 在运行过程中的电价套利、运维费用等因素,建立了容量配置模型。该模型以 DESS 接入配电网后的投资经济性最优为目标函数,如式(7)所示。

$$\min \{ C_{IN}^{DESS} + C_{PA}^{DESS} + C_{UP}^{DN} \} \quad (7)$$

$$C_{IN}^{DESS} = E^{DESS} p_{rIN, E}^{DESS} + P_{total}^{DESS} p_{rIN, P}^{DESS} + \sum_{n=1}^Y [(1-\eta_n^{DESS})^n E^{DESS} p_{rMT, i}^{DESS}] \quad (8)$$

$$C_{PA}^{DESS} = \sum_{n=1}^Y \{ [(1-\eta_n^{DESS}) \eta_{oe}^{DESS}]^n E^{DESS} (p_{rch}^{DESS} - p_{rdis}^{DESS}) \} \quad (9)$$

$$C_{UP}^{DN} = \sum_{n=1}^Y (1+\eta_{load})^n k_{up} \quad (10)$$

$$E^{DESS} = \sum_{i=1}^M E_i^{DESS} \quad (11)$$

$$P_{total}^{DESS} = \sum_{i=1}^M P_i^{DESS} \quad (12)$$

其中, C_{IN}^{DESS} 为 DESS 的投资建设成本; C_{PA}^{DESS} 为 DESS 的电价套利; C_{UP}^{DN} 为配电网的升级改造费用; E^{DESS} 为配置 DESS 的总容量, 为决策变量; P_{total}^{DESS} 为配置 DESS 的总功率, 为决策变量; $p_{rIN, E}^{DESS}$ 、 $p_{rIN, P}^{DESS}$ 、 $p_{rMT, i}^{DESS}$ 分别为 DESS 单位容量、单位功率的安装费用和维修费用; η_n^{DESS} 为 DESS 的损耗率; Y 为容量配置的规划时间; p_{rch}^{DESS} 、 p_{rdis}^{DESS} 分别为 DESS 的充电、放电电价; η_{oe}^{DESS} 为 DESS 在电价套利过程中的容量使用率; η_{load} 为年负荷增长率; k_{up} 为负荷增长对配电网升级改造的费用; M 为 DESS 的数量; E_i^{DESS} 和 P_i^{DESS} 分别为第 i 个 DESS 的配置容量和配置功率。

2.2 布点优化模型

随着配电网中接入分布式电源、电动汽车充电站等随机扰动电源和负荷,配电网运行将呈现峰谷差、负荷波动增大等现象。为了使 DESS 协同负荷调峰/调谷、平抑负荷波动,本文采用最小化负荷方差为目标函数,其数学含义为随机变量偏离其均值的程度^[18-20],如式(13)所示。该模型的决策变量为 DESS 的配置位置、配置容量及最大充放电功率,其中配置位置为布尔变量,配置容量和最大充放电功率为连续变量。

$$\min \sum_{i=1}^T \frac{1}{T} [P^{DN}(t) - P^{ave}]^2 \quad (13)$$

$$P^{DN}(t) = \sum_{i=1}^N [P_{load, i}(t) + P_{PV, i}(t) + P_{wind, i}(t) + P_{evs, i}(t) + D_{Li} P_i^{DESS}(t)] \quad (14)$$

$$P^{ave} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P^{DN}(t) \quad (15)$$

$$D_{Li} = \begin{cases} 0 & \text{节点 } i \text{ 处不配置 DESS} \\ 1 & \text{节点 } i \text{ 处配置 DESS} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $P_{load, i}(t)$ 、 $P_{PV, i}(t)$ 、 $P_{wind, i}(t)$ 、 $P_{evs, i}(t)$ 、 $P_i^{DESS}(t)$ 分别为配电网中节点 i 处 t 时刻的负荷、分布式光伏、分布式风机、电动汽车充电站和 DESS 的有功功率; D_{Li} 为配电网中节点 i 处是否配置 DESS 的标志, 其值为 1 表示在节点 i 处配置 DESS, 其值为 0 表示在节点 i 处不配置 DESS; $P^{DN}(t)$ 为 t 时刻配电网的负荷功率; P^{ave} 为运行周期内配电网的负荷平均值; T 为运行周期; N 为配电网中的节点数。

约束条件如下。

a. 静态潮流约束。负荷、DER、DESS 协同参与配电网运行,需满足配电网当前时间断面的静态潮流约束,即:

$$P_{PV, i} + P_{wind, i} + P_{evs, i} + P_i^{DESS} + P_{load, i} = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (17)$$

$$Q_{PV, i} + Q_{wind, i} + Q_{evs, i} + Q_i^{DESS} + Q_{load, i} = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (18)$$

其中, $Q_{PV, i}$ 、 $Q_{wind, i}$ 、 $Q_{evs, i}$ 、 Q_i^{DESS} 和 $Q_{load, i}$ 分别为配电网中节点 i 处 t 时刻的分布式光伏、分布式风机、电动汽车充电站、DESS 和负荷的无功功率; U_i 为节点 i 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点导纳矩阵的实部、虚部和节点 i 与 j 间电压的相角差。

b. 电压限制约束。DER 和 DESS 在参与配电网运行时,各节点电压应在安全约束范围之内,即:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (19)$$

其中, $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为节点电压的上、下限。

c. DER 和电动汽车功率约束。当 DER 和电动汽车充电站接入配电网后,其发电功率应在设备的设定范围之内,即:

$$P_{PV}^{\min} \leq P_{PV} \leq P_{PV}^{\max} \quad (20)$$

$$Q_{PV}^{\min} \leq Q_{PV} \leq Q_{PV}^{\max} \quad (21)$$

$$P_{wind}^{\min} \leq P_{wind} \leq P_{wind}^{\max} \quad (22)$$

$$Q_{wind}^{\min} \leq Q_{wind} \leq Q_{wind}^{\max} \quad (23)$$

$$P_{evs}^{\min} \leq P_{evs} \leq P_{evs}^{\max} \quad (24)$$

$$Q_{evs}^{\min} \leq Q_{evs} \leq Q_{evs}^{\max} \quad (25)$$

其中,上标 min、max 分别表示相应设备有功/无功出力的最小值和最大值。

d. DESS 容量/功率约束。DESS 参与配电网优

化运行时,应满足自身功率和容量限制,即:

$$P_i^{\text{DESS},\min} \leq P_i^{\text{DESS}} \leq P_i^{\text{DESS},\max} \quad (26)$$

$$Q_i^{\text{DESS},\min} \leq Q_i^{\text{DESS}} \leq Q_i^{\text{DESS},\max} \quad (27)$$

$$E_i^{\text{DESS},\min} \leq E_i^{\text{DESS}} \leq E_i^{\text{DESS},\max} \quad (28)$$

$$E_i^{\text{DESS}}(t_{\text{strat_time}}) = E_{i\text{init}} \quad (29)$$

$$\text{sum}(D_{Li}) = M \quad (30)$$

$$E_i^{\text{DESS}}(t_{\text{strat_time}}) = E_i^{\text{DESS}}(t_{\text{end_time}}) \quad (31)$$

其中, $E_i^{\text{DESS}}(t_{\text{strat_time}})$ 、 $E_i^{\text{DESS}}(t_{\text{end_time}})$ 分别为节点 i 处的 DESS 在运行周期内起始时间和截止时间的能量容量,将两者数值设置相等,使 DESS 有一定的调控潜力,在满足运行周期的调控外,还可用于下一周期的起始调用; $E_{i\text{init}}$ 为节点 i 处的 DESS 起始容量的设定值; $\text{sum}(D_{Li})$ 为配电网中节点 i 处的 DESS 布点数量之和。

2.3 模型求解

通过分析可知,上层容量配置模型为 LP 模型,能够求解 DESS 接入配电网后的总功率水平、能量容量上限;下层布点优化模型为 MINLP 模型,该模型以上层模型的求解结果作为其总容量约束,可求解得到 DESS 的布点数量、布点位置和单体容量配置,并将得到 DESS 的配置方案,传递到上层容量配置模型中可求解考虑 DESS 布点数量、位置和容量配置的准确规划投资成本经济性。仿真环境是 YALMIP+MATLAB,使用 CPLEX 求解器对 LP 和 MINLP 模型进行求解。模型求解流程如图 3 所示,求解流程如下:

- 算法初始化,设定容量配置模型的参数;
- 求解配置 DESS 的总功率水平和能量容量上限约束;
- 设定布点优化模型的参数,输入 DESS 的布点数量,遍历网络拓扑中的节点,求解在不同配置数

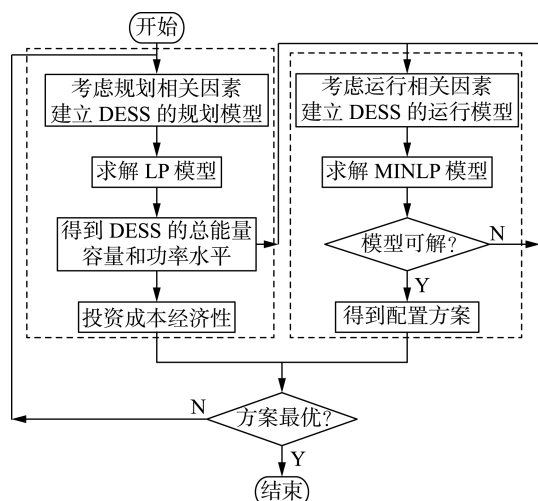


图 3 模型求解流程

Fig.3 Flowchart of solving model

量下 DESS 的布点位置和容量配置方案;

d. 转步骤 b, 对比在运行模型下求解的不同 DESS 配置方案在规划阶段的经济性;

e. 输出结合规划经济性和运行高效性的最优配置方案, 算法结束。

3 算例分析

为了验证本文所提方法的可行性, 采用图 4 所示 IEEE 33 节点配电网系统网络拓扑为验证算例, 在节点 8、27 接入 200 kW 的分布式光伏设备, 节点 6 接入 180 kW 的分布式风力发电装置, 节点 21 接入 200 kW 的电动汽车充电站; 将容量配置的规划周期设为 5 a, 功率数据时间间隔为 1 h, 典型日运行周期为 24 h。规划周期的投资建设成本、分时电价差、升级维修成本等参数见文献[18]; 设定单个 DESS 的额定功率为 200 kW, 额定容量为 800 kW·h; 配电网的负荷功率、各节点用电负荷见附录中的图 A1; 分布式风力发电出力、光伏出力和电动汽车充电桩功率见附录中的图 A2。配电网的优化运行评价指标为:

$$\mu = L_{\text{dn}}^{\text{avg}} / L_{\text{dn}}^{\text{max}} \quad (32)$$

其中, μ 为配电网的负荷功率因数; $L_{\text{dn}}^{\text{avg}}$ 为配电网的负荷功率平均值; $L_{\text{dn}}^{\text{max}}$ 为配电网的负荷功率最大值。

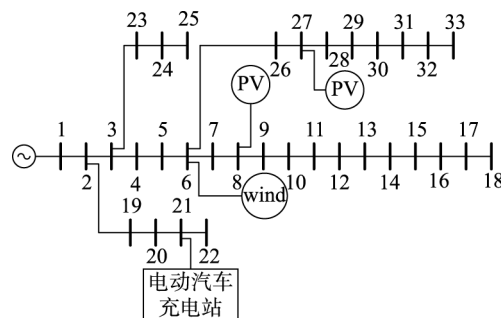


图 4 IEEE 33 节点配电网的拓扑结构

Fig.4 Topological structure of IEEE 33-bus distribution network

针对算例设定的不同场景进行分析, 如表 1 所示。在场景 1 中, 设定接入配电网的 DESS 数量为 4, 且无容量限制, 该场景下配电网的负荷优化运行曲线如图 5 所示。由图 5 可知, DER 和电动汽车接入配电网运行后, 均满足静态安全约束和电压节点约束, 可稳定运行, 其接入前、后配电网的负荷功率因数分别为 0.76、0.79, 负荷功率因数未得到明显的改善, 这是因为分布式电源和电动汽车是按照各自运行目标在安全约束条件下运行, 并未参与配电网的整体优化运行。当 4 个 DESS 接入配电网运行后, 经过计算, DESS 的最优规划布点为节点 7、28、31、32, 其输入/输出功率的进程为: 01:00—10:00 时段 DESS 持续充电, 17:00—23:00 时段 DESS 进行放

电,容量使用效率达到 100%,说明 DESS 接入配电网后对负荷功率因数有较大的改善作用,可减少配电网中的尖峰用能,并使负荷功率曲线更加平滑。

表 1 算例场景

Table 1 Example scenarios

场景	DESS 数量	DESS 容量有无限制	应用场景
1	4	无	DESS 参与配电网负荷优化
2	4	无	容量限制对 DESS 布点及负荷优化的影响
	4	有	
3	4	无	不同数量 DESS 对位置选取及负荷优化的影响
	5	无	
	6	无	

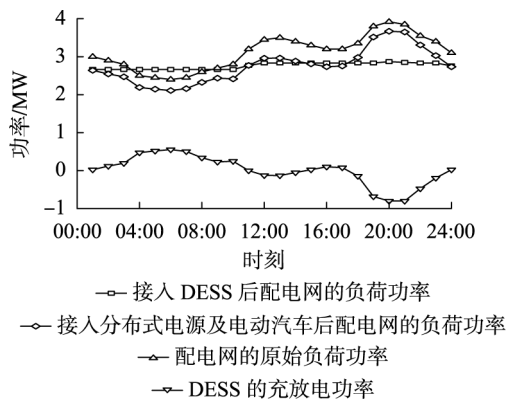


图 5 场景 1 中配电网负荷

Fig.5 Load of distribution network in Scenario 1

场景 2 在优化配置模型中考虑 DESS 的容量限制,设定其最大能量容量不可超过 700 kW·h,最小能量容量不可小于 100 kW·h,以此防止 DESS 过充或过放,延长 DESS 的使用寿命,其出力曲线、容量曲线分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出,有容量限制的 DESS 的输入/输出功率在 00:00—02:00 时段大于无容量限制的 DESS 输入/输出功率,这是因为前者为了防止 DESS 过充/过放,设定了能量和功率初始值。从图 7 中可以看出,00:00—06:00 和 20:00—24:00 时间段内,有容量限制的 DESS 的能量容量大于无容量限制的 DESS 的能量容量,这是因为容量限制的安全约束使得有容量限制的 DESS 的容量调节范围较小,从而将 DESS 的动态运行容量轨迹有效地控制在限制范围内。

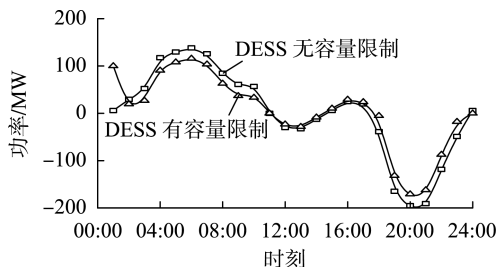


图 6 场景 2 中 DESS 出力

Fig.6 Output power of DESS in Scenario 2

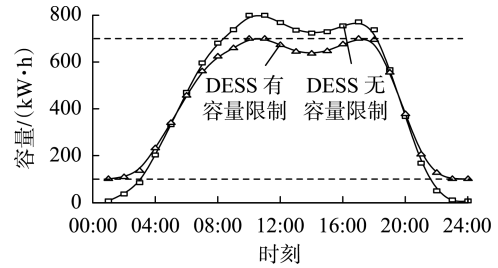


图 7 场景 2 中 DESS 容量

Fig.7 Capacity of DESS in Scenario 2

场景 3 设定不同数量的 DESS 对配电网负荷运行的影响,该场景下 DESS 的充放电功率曲线如图 8 所示。配置不同数量 DESS 下的布点位置如图 9 所示,配置结果如表 2 所示。从图 8 和表 2 中可以看出,当 DESS 配置数量为 4 时,在无容量限制情形下,DESS 的最大充电容量和最大能量容量均达到额定值,但在有容量限制情形下,DESS 的最大充放电功率均未达到额定值,这说明容量限制这一安全约束不仅可以有效地限制 DESS 的容量越限,还可限值 DESS 的功率达到极限值;当配电网中接入 5 个 DESS 时,最大荷电状态达到额定值,但是充放电功率均未达到额定值;当配电网中接入 6 个 DESS 时,最大荷电状态仅为 86.6%,留有较大的裕度,可在优化配置方案中设定容量及功率较为合适的 DESS,以保证容量配置的经济性。

相比于 DESS 接入前配电网的负荷功率曲线,DESS 的接入有效地降低了配电网的运行方差和负荷功率因数。当 DESS 的配置数量为 4 时,限制 DESS 的容量对配电网的负荷优化有一定的消极影响,相比于 DESS 无容量限制,DESS 有容量限制时的运行方差增大了 10 589 kW²,负荷功率因数减少了 0.05,这是因为 DESS 的容量限制减小了其参与配电网的功率调节;当 DESS 的配置数量为 5 和 6 时,其负荷功率因数分别为 0.95 和 0.99,说明在算例设定运行场景中,DESS 接入配电网已使负荷接近最优化运行,可有效减小配电网的尖峰用能,而前者在容量利用率和功率利用率上均优于后者。由图 9 可以看出,为了使 DESS 接入配电网后按优化目标运行,其配置数量的不同使布点位置也不同,可运用

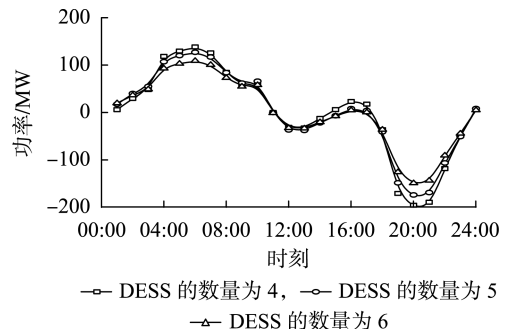


图 8 场景 3 中 DESS 出力

Fig.8 Output power of DESS in Scenario 3

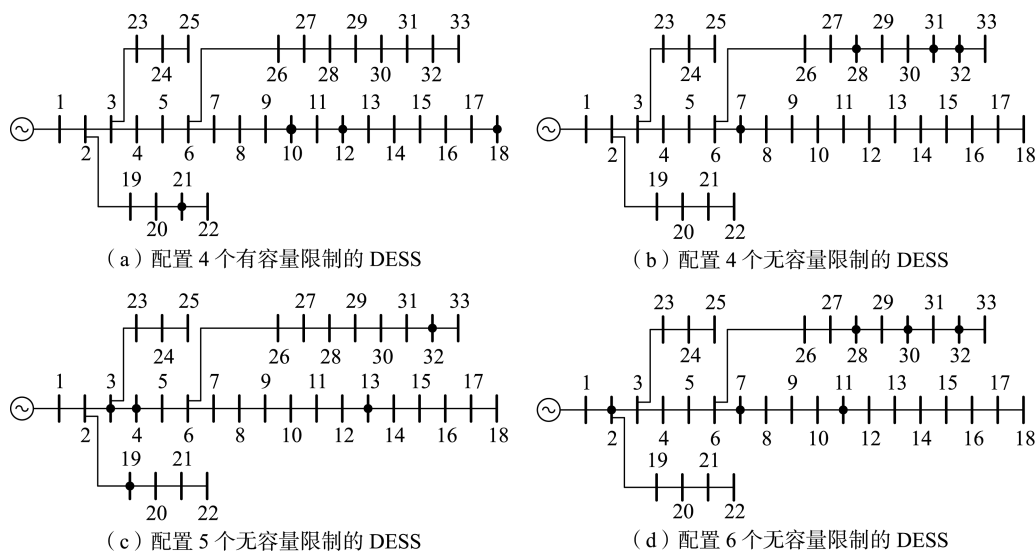


图 9 DESS 在配电网中的布点位置

Fig.9 Location of DESS in distribution network

表 2 算例配置结果

Table 2 Configuration results of example

DESS 数量	图 9 中子图	有无容量限制	DESS 布点位置	最大充电功率/kW	最大放电功率/kW	最大占用容量/(kW·h)	运行方差/kW ²	负荷功率因数	总功率配置/kW	总能量配置/(kW·h)	容量配置成本/\$
0	—	—	—	—	—	—	202 090	0.79	—	—	—
4	(a)	有	10,12,18,21	178	116	700	17 630	0.86	—	—	—
4	(b)	无	7,28,31,32	200	138	800	7 041	0.91	800	3 200	32 200
5	(c)	无	3,4,13,19,32	178	127	800	208	0.95	890	4 000	28 400
6	(d)	无	2,7,11,28,30,32	147	125	693	13	0.99	942	4 158	29 200

求取的布点方案为规划提供指导。

对比规划经济性结果,定量分析在不同的 DESS 布点数量下,各功率水平配置和规划容量配置成本经济性的情况,当 DESS 的配置数量为 5 时,经济性最优;当配置数量为 4 时,其容量配置较小,在长期规划中电价套利收益较少;当配置数量为 6 时,DESS 的安装维护费用增加。综上所述,在设定规划周期和考虑典型运行场景的情形下,最优 DESS 的配置方案为:在节点 3、4、13、19、32 处配置 5 个额定容量为 800 kW·h、功率为 178 kW 的 DESS。此时,规划经济性最优,并且配置能量和功率的利用率达到 100%,DESS 高效运行。

4 结论

随着 DESS 技术经济性的提高,在配电网中广域布点 DESS 成为可能。本文针对 DESS 有序接入面临的规划与运行问题,提出了一种 DESS 在配电网中的优化布点及容量配置综合优化方法,并利用 IEEE 33 节点系统算例对所提模型与方法的有效性进行了验证,在此基础上,给出了多点布局 DESS 的优化配置方案,所得结论如下。

a. 利用 DESS 容量配置和有序布点综合优化模型可以在配电网拓扑和用电负荷设定的情景下实

现 DESS 的配置数量、安装选址及容量确定,从而验证了本文所提模型具有较好的工程实践指导意义和实际应用价值。

b. 通过 3 个场景对比,说明优化配置 DESS 可有效减少尖峰用能,高效利用其配置容量,并得出有容量限制的 DESS 在优化结果上稍差于无容量限制的 DESS。在典型场景下,配置 5 个额定容量为 800 kW·h、功率为 178 kW 的 DESS 可使规划经济性和运行高效性综合最优。

c. DESS 的投资建设成本较高,需结合其规划阶段和运行阶段的综合分析,在不同时间尺度下衡量其在电力系统中起到的优化作用,不能盲目追求运行高效,否则会大幅增加系统的投建成本。

d. 对于配电网运营公司而言,可通过在配电网中有序接入 DESS,辅助减少电网的建设投资运维费用。目前 DESS 的容量较小,将其大规模应用于配电网调峰及电力阻塞,还需进一步提升储能的技术经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李洋,蔡志远,刘海涛,等. 广域分布式电源运营管控系统[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):102-108.

- LI Yang, CAI Zhiyuan, LIU Haitao, et al. Management and control system of wide-area distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 102-108.
- [2] 林君豪, 张焰, 陈思, 等. 考虑可控负荷影响的主动配电系统分布式电源优化配置[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 46-53.
- LIN Junhao, ZHANG Yan, CHEN Si, et al. Optimal DG allocation considering effect of controllable load for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 46-53.
- [3] 王成山, 武震, 李鹏. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 1-8, 73.
- WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 1-8, 73.
- [4] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.
- LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25.
- [5] 李秀磊, 耿光飞, 李玉琦, 等. 含分布式电源的配电网中电池储能系统运行策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 59-65.
- LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Operation strategy of battery energy storage system in distribution network with distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 59-65.
- [6] STRBAC G, AUNEDI M, KONSTANTELOS I, et al. Opportunities for energy storage: assessing whole-system economic benefits of energy storage in future electricity systems[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(5): 32-41.
- [7] 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.
- [8] 肖峻, 张泽群, 张磐, 等. 用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 19-26.
- XIAO Jun, ZHANG Zequn, ZHANG Pan, et al. A capacity optimization method of hybrid energy storage system for optimizing tie-line power in microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 19-26.
- [9] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑微网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 12-17.
- WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. An energy storage system capacity optimization method for microgrid tie-line power flow stabilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 12-17.
- [10] 吴俊宏, 谢胤喆, 储真荣. 微能源网商业运营服务产品探索[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 148-151.
- WU Junhong, XIE Yinze, CHU Zhenrong. Exploration for commercial products of micro energy grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 148-151.
- [11] CARPINELLI G, CELLI G, MOCCI S, et al. Optimal integration of distributed energy storage devices in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 985-995.
- [12] SHEN X W, SHAHIDEHPOUR M, HAN Y D, et al. Expansion planning of active distribution networks with centralized and distributed energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 126-134.
- [13] AWAD A S A, EL-FOULY T H M, SALAMA M M A. Optimal ESS allocation for benefit maximization in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1668-1678.
- [14] 韦立坤, 赵波, 吴红斌, 等. 虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 66-74.
- WEI Likun, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal allocation model of energy storage system in virtual power plant environment with a high penetration of distributed photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 66-74.
- [15] 沈欣炜, 朱守真, 郑竞宏, 等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1913-1920.
- SHEN Xinwei, ZHU Shouzheng, ZHENG Jinghong, et al. Active distribution network planning-operation co-optimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1913-1920.
- [16] 所丽, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑削峰填谷的配电网集中型充电站选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1052-1060.
- SUO Li, TANG Wei, BAI Muke, et al. Locating and sizing of centralized charging stations in distribution network considering load shifting[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1052-1060.
- [17] SORTOMME E, HINDI M M, MACPHERSON S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [18] XU Q S, DING Y F, YAN Q G, et al. Day-ahead load peak shedding/shifting scheme based on potential load values utilization: theory and practice of policy-driven demand response in China[J]. IEEE Access, 2017, 5: 22892-22901.
- [19] GHAVAMI A, KAR K, GUPTA A. Decentralized charging of plug-in electric vehicles with distribution feeder overload control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(11): 3527-3532.
- [20] YU L, ZHAO T Y, CHEN Q F, et al. Centralized bi-level spatial-temporal coordination charging strategy for area electric vehicles[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 74-83.

作者简介:



贾雨龙

贾雨龙(1989—),男,山西晋中人,博士研究生,通信作者,主要研究方向为分布式储能运行和柔性负荷聚合技术(E-mail: jiayulong1110@126.com);

米增强(1960—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为新能源电力系统、柔性负荷聚合及调控技术

(E-mail: mizengqiang@sina.com);

刘力卿(1987—),男,河北邢台人,工程师,博士,主要研究方向为储能控制技术、新能源电力系统(E-mail: liuliqing328@163.com)。

(下转第16页 continued on page 16)

Lineage chain mark fault-tolerant method for micro-batching of distribution network monitoring data

QU Zhijian, PENG Xiang, WANG Qunfeng, WANG Hanlin

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the existing problems of monitoring message blowout and lacking of efficient distributed fault-tolerant mechanism for huge amounts of monitoring data in the distributed distribution automation system, a novel lineage chain mark fault-tolerant method is proposed. The retrospection of lineage chain and the automatic selection of conditional marks in the distributed data fault-tolerant progress are realized by applying the design technique of fusing the resilient distributed data set, the record-level fault-tolerant of micro-batching computing and the lineage chain mark sequence. The monitoring data of railway distribution network are taken as the simulation example and the dispatch monitoring platform of a 4-generator cluster is built to carry out the fault-tolerant test. A single-node fault with the highest frequency is taken as an example, whose test results show that, for the resilient distributed data set including 3×10^6 monitoring data records, the average CPU utilization rate fluctuation is less than 1.5% and the disk utilization rate decreases by 4.2%; when the number of iteration increases to 600 and 800, the time-consuming decreases by 24.3% and 42.9% respectively; the proposed method not only realizes the stream processing delay of 500 ms, but also has a better optimization effect on the usage of cluster resources, verifying the effectiveness of the method for distributed cluster fault-tolerant.

Key words: distribution automation system; distribution network monitoring data; distributed cluster; micro-batching computing; lineage chain mark; stream computing; fault-tolerant

(上接第 7 页 continued from page 7)

Comprehensive optimization method of capacity configuration and ordered installation for distributed energy storage system accessing distribution network

JIA Yulong¹, MI Zengqiang¹, LIU Liqing², YIN Qukai¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300092, China)

Abstract: With the continuous technical economy improvement of electric energy storage, it has become a development trend to assess a large number of DESSs (Distributed Energy Storage Systems) in the distribution network. Aiming at the planning and operation problems faced by ordered access of DESSs, a comprehensive optimization method for capacity configuration and ordered installation of DESS is proposed. The upper layer model is the capacity configuration model, which considers the investment income of DESS and slowing down the capacity increase of distribution network. The lower layer model is the installation spot optimization model, which considers the characteristics and capacity limit of DESS, the load regulation for peak-load shifting and power fluctuation smoothing. The validity of the proposed method is verified by the example of IEEE 33-bus system, based on which, the placement scheme of DESS accessing to distribution network is obtained. Simulative results show that, the proposed comprehensive optimization method is suitable for different application scenarios with the integration of DESS of different capacity configurations and different installation spots and can provide a technical support for the planning and managing of large-scale DESS accessing to the distribution network.

Key words: distributed energy storage system; distribution network; ordered installation; comprehensive optimization model; placement scheme; capacity configuration

附 录

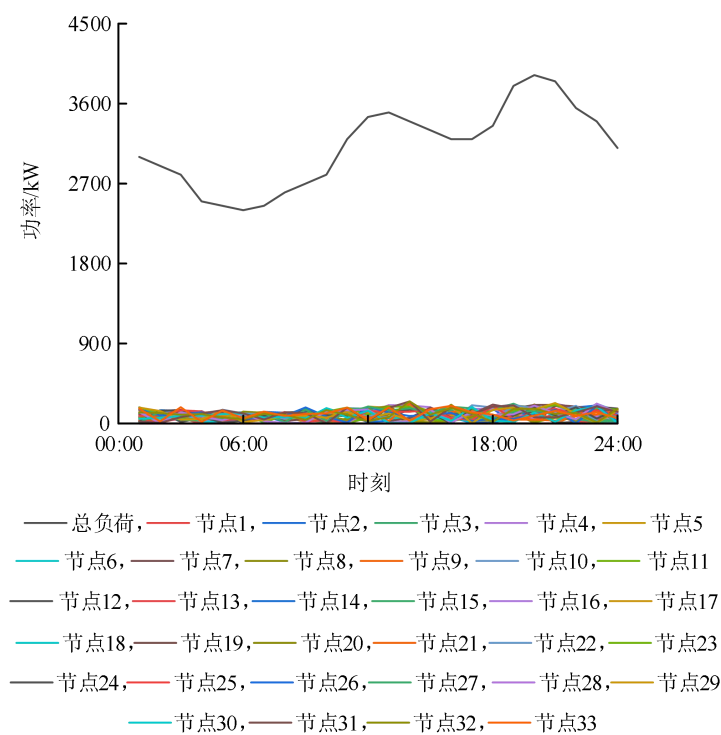


图 A1 配电网的负荷功率

Fig.A1 Load power of distribution network

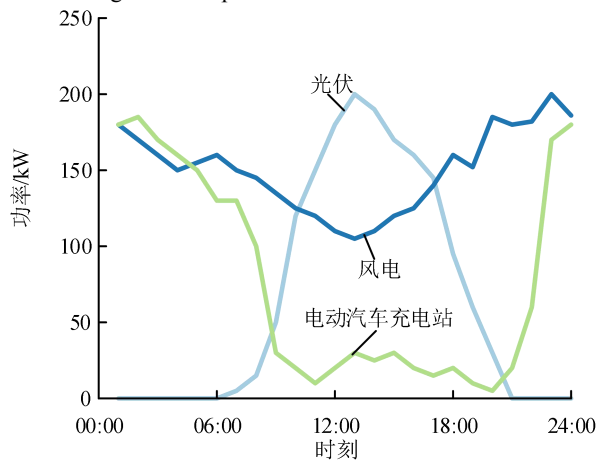


图 A2 分布式电源的出力曲线

Fig.A2 Output power of DGs