



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110147899 B

(45) 授权公告日 2023.12.22

(21) 申请号 201810144913.9

G06Q 50/06 (2012.01)

(22) 申请日 2018.02.12

(56) 对比文件

CN 107069814 A, 2017.08.18

CN 107611970 A, 2018.01.19

JP H02101501 A, 1990.04.13

刘晓华 等.连续时间多面体不确定系统的
鲁棒预测控制.《系统工程与电子技术》.2008,第
30卷(第02期),全文.

审查员 王洋

(43) 申请公布日 2019.08.20

(73) 专利权人 香港理工大学

地址 中国香港九龙红磡理工大学陈鲍雪莹
楼10楼1009室

(72) 发明人 赵健 许昭

(74) 专利代理机构 隆天知识产权代理有限公司
72003

专利代理人 李昕巍 章侃铱

(51) Int.Cl.

G06Q 10/04 (2023.01)

G06Q 10/0637 (2023.01)

权利要求书3页 说明书10页 附图5页

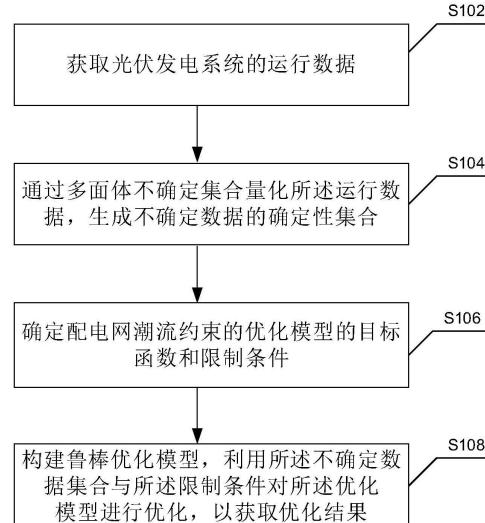
(54) 发明名称

配电网分布式储能投资优化方法及装置

(57) 摘要

本申请公开一种配电网分布式储能投资优化方法及装置。涉及配电网分布式储能优化领域，该方法包括：获取光伏发电系统的运行数据，通过多面体不确定集合量化所述运行数据，生成不确定数据的确定性集合；确定配电网潮流约束优化模型的目标函数和限制条件，构建鲁棒优化模型，利用所述不确定数据集合与所述限制条件对所述数学模型进行优化，以获取优化结果。本申请公开的配电网分布式储能投资优化方法及装置，能够提供稳健的分布式能源存储系统投资预估，同时对冲由光伏发电引起的不确定性影响。

10



1. 一种配电网分布式储能投资优化方法，其特征在于，包括：
 获取光伏发电系统的运行数据；
 通过多面体不确定集合量化所述运行数据，生成不确定数据的确定性集合；
 确定配电网潮流约束优化模型的目标函数和限制条件；以及
 构建鲁棒优化模型，利用所述不确定数据的确定性集合与所述限制条件对所述优化模型进行优化，以获取优化结果；

其中，所述通过多面体不确定集合量化所述运行数据，生成不确定数据的确定性集合，包括：

$$\begin{aligned}\Xi_{us}(z_{r,t}^1, z_{r,t}^2) &= \{U : U = [P_{r,t}^R] \\ P_{r,t}^R &= (1 - z_{r,t}^1 - z_{r,t}^2)P_r^{R,AU} + z_{r,t}^1P_r^{R,LB} + z_{r,t}^2P_r^{R,UB}, \forall t \in T, \forall r \in \Phi_j^R \\ z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 &\leq 1, \forall t \in T, \forall r \in \Phi_j^R \\ \sum_{\forall t \in T} z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 &\leq \Gamma^{Ti}, r \in \Phi_j^R \\ \sum_{\forall r \in \Phi_j^R} z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 &\leq I^{Sp}, t \in T \};\end{aligned}$$

其中， $\Xi_{us}(z_{r,t}^1, z_{r,t}^2)$ 为光伏发电系统不确定数据集合， $z_{r,t}^1, z_{r,t}^2$ 为辅助二进制变量， $P_{r,t}^R$ 为配电网中r节点在t时刻的真实光伏出力， $P_r^{R,AU}$ 为配电网中r节点平均光伏出力， $P_r^{R,LB}$ 与 $P_r^{R,UB}$ 为配电网在r节点的光伏出力的上限与下限，T表示时间节点集合， Φ_j^R 表示节点j的可再生分布式发电节点的集合， Γ^{Ti} 、 Γ^{Sp} 分别表示光伏出力在t时刻和r节点的不确定性预算限制；

所述构建鲁棒优化模型，利用所述不确定数据的确定性集合与所述限制条件对所述优化模型进行优化包括：

通过基于两阶段鲁棒优化的鲁棒规划问题对所述优化模型进行优化，将优化问题分为两部分：确定性优化模型和可行性检验。

2. 如权利要求1所述的方法，其特征在于，还包括：

通过所述优化结果对配电网分布式储能投资分析。

3. 如权利要求1所述的方法，其特征在于，所述确定配电网潮流约束优化模型的目标函数和限制条件，包括：

$$\min \sum_{j \in J} \alpha_j Cap_j^s CC_s$$

其中， α_j 为二进制变量，用来表征是否在节点j下进行投资， $\alpha_j = 0$ 表示不投资， $\alpha_j = 1$ 表示投资， Cap_j^s 为分布式储能j节点的投资容量， CC_s 为储能投资成本。

4. 如权利要求1所述的方法，其特征在于，所述确定配电网潮流约束优化模型的目标函数和限制条件，包括：

确定电力系统最优潮流限制条件；

确定功率与电压限制条件；

确定投资成本限制条件；

确定网络运行限制条件；以及

确定动态储能与容量限制条件。

5. 如权利要求4所述的方法,其特征在于,所述电力系统最优潮流限制条件,包括以下公式:

$$P_{j,t} = \sum_{i \in \Omega_j} P_{i,t} + P_{j,t}^D - \sum_{r \in \Phi_r^R} P_{r,t}^R + P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dch}, \forall j \in J, \forall t \in T;$$

$$Q_{j,t} = \sum_{i \in \Omega_j} Q_{i,t} + Q_{j,t}^D - \sum_{c \in \Phi_c^P} Q_{c,t}^P, \forall j \in J, \forall t \in T;$$

$$V_{j,t} = V_{i,t} + (r_{ij} P_{i,t} + x_{ij} Q_{i,t}), \forall j \in J, \forall i \in \Omega_j, \forall t \in T;$$

$$V_{j,t} = V_s, j = 1, \forall t \in T;$$

$$1 - \sigma \leq V_{j,t} \leq 1 + \sigma, \forall j \in J, \forall t \in T;$$

其中, $P_{j,t}$ 为 j 节点在 t 时刻的有功潮流, J 为配电网节点集合, $P_{j,t}^D$ 为 j 节点在 t 时刻的负荷, $P_{r,t}^R$ 为 r 节点在 t 时刻的光伏机组出力, $P_{j,t}^{ch}$ 为 j 节点在 t 时刻的充电功率, $P_{j,t}^{dch}$ 为 j 节点在 t 时刻的放电功率, $Q_{j,t}$ 为 j 节点在 t 时刻的无功潮流, $Q_{j,t}^D$ 为 j 节点在 t 时刻的无功负载需求, $Q_{c,t}^P$ 为 c 节点在 t 时刻自动电压调节器的输出, $V_{j,t}$ 为 j 节点在 t 时刻的电压, r_{ij} 与 x_{ij} 为 ij 线阻抗, Ω_j 为节点 j 的子节点集合, V_s 为变电站电压, σ 为电压波动允许范围。

6. 如权利要求4所述的方法,其特征在于,所述投资成本限制条件包括以下公式:

$$CC_j^s = \frac{z \cdot (1+z)^\tau}{cap_s \cdot ((1+z)^\tau - 1)} \cdot C_{inv};$$

$$\sum_{j \in J} \alpha_j \leq N_s;$$

$$\sum_{j \in J} \alpha_j CC_j^s \leq CC_{sum}^s;$$

其中, CC_j^s 为分布式储能年化投资成本, z 为年利率, τ 为设备寿命, C_{inv} 为分布式储能投资成本, N_s 为分布式储能最大允许数量, CC_{sum}^s 为分布式储能最大投资总容量, α_j 为二进制变量, 用来表征是否在节点 j 下进行投资, $\alpha_j = 0$ 表示不投资, $\alpha_j = 1$ 表示投资, cap_s 为分布式储能的投资容量。

7. 如权利要求4所述的方法,其特征在于,所述网络运行限制条件包括以下公式:

$$P_{min}^{sub} \leq P_{j,t} \leq P_{max}^{sub}, j = 1, \forall t \in T;$$

$$-P_{ij}^{cap} \leq P_{i,t} \leq P_{ij}^{cap}, i \in \Omega_j, j \in J, \forall t \in T;$$

$$Q_{min}^P \leq Q_{c,t}^P \leq Q_{max}^P, c \in \Phi_c^P, \forall t \in T;$$

其中, P_{min}^{sub} 与 P_{max}^{sub} 为配电网接入变电站的有功功率的下限与上限, $P_{j,t}$ 为 j 节点在 t 时刻的有功潮流, P_{ij}^{cap} 为 ij 线的容量, Q_{min}^P 与 Q_{max}^P 为自动电压调节器的输出下限与上限, $Q_{c,t}^P$ 为 c 节点在 t 时刻自动电压调节器的输出, J 为配电网节点集合, Ω_j 为节点 j 的子节点集合, Φ_c^P 为节点 j 的自动电压调节器节点集合。

8. 如权利要求4所述的方法,其特征在于,所述动态储能与容量限制条件包括以下公式:

$$E_{j,t} = E_{j,t-1} + (\eta_e P_{sj,t}^{ch} - \frac{1}{\eta_{dc}} P_{sj,t}^{ch}) \cdot \Delta t, j \in J, t \in T;$$

$$Cap_j^s \rho_{j,t}^{\min} \leq E_{j,t} \leq Cap_j^s \rho_{j,t}^{\max}, j \in J, t \in T;$$

$$E_{j,t} = Cap_j^s \cdot \rho_j^{ini}, j \in J, t = 0;$$

$$0 \leq P_{j,t}^{ch} \leq P_{ch}^{\max} \alpha_j^c, \forall j \in J, \forall t \in T;$$

$$0 \leq P_{j,t}^{dch} \leq P_{dch}^{\max} \alpha_j^d, \forall j \in J, \forall t \in T;$$

$$\alpha_j^c + \alpha_j^d \leq 1, j \in J;$$

$$\alpha_j, \alpha_j^c, \alpha_j^d \in \{0,1\}, j \in J;$$

其中, $E_{j,t}$ 为分布式储能中 j 点在 t 时刻的能量值, η_c 与 η_{dc} 为分布式储能充电与放电效率, Cap_j^s 为分布式储能 j 节点的投资容量, $P_{j,t}^{dch}$ 为 j 节点在 t 时刻的放电功率, $\rho_{j,t}^{\min}$ 与 $\rho_{j,t}^{\max}$ 为分布式储能中 j 节点在 t 时刻的最小与最大能量状态的百分比数值, ρ_j^{ini} 为 j 点初始能量状态的百分比数值, P_{ch}^{\max} 为最大充电功率, P_{dch}^{\max} 为最大放电功率, α_j^c 与 α_j^d 为代表分布式储能进行充放电的二进制变量。

9. 一种配电网分布式储能投资优化装置, 其特征在于, 包括:

数据模块, 用于获取光伏发电系统的运行数据,

集合模块, 用于通过多面体不确定集合量化所述运行数据, 生成不确定数据的确定性集合; 其中, 所述通过多面体不确定集合量化所述运行数据, 生成不确定数据的确定性集合, 包括:

$$\Xi_{us}(z_{r,t}^1, z_{r,t}^2) = \{U : U = [P_{r,t}^R]$$

$$P_{r,t}^R = (1 - z_{r,t}^1 - z_{r,t}^2)P_r^{R,AV} + z_{r,t}^1 P_r^{R,LB} + z_{r,t}^2 P_r^{R,UB}, \forall t \in T, \forall r \in \Phi_j^R$$

$$z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq 1, \forall t \in T, \forall r \in \Phi_j^R$$

$$\sum_{\forall t \in T} z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq \Gamma^{Ti}, r \in \Phi_j^R$$

$$\sum_{\forall r \in \Phi_j^R} z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq I^{Sp}, t \in T \};$$

其中, $\Xi_{us}(z_{r,t}^1, z_{r,t}^2)$ 为光伏发电系统不确定数据集合, $z_{r,t}^1, z_{r,t}^2$ 为辅助二进制变量, $P_{r,t}^R$ 为配电网中 r 节点在 t 时刻的真实光伏出力, $P_r^{R,AV}$ 为配电网中 r 节点平均光伏出力, $P_r^{R,LB}$ 与 $P_r^{R,UB}$ 为配电网在 r 节点的光伏出力的上限与下限, T 表示时间节点集合, Φ_j^R 表示节点 j 的可再生分布式发电节点的集合, Γ^{Ti} 、 Γ^{Sp} 分别表示光伏出力在 t 时刻和 r 节点的不确定性预算限制;

条件模块, 用于确定配电网潮流约束优化模型的目标函数和限制条件; 以及

优化模块, 用于构建鲁棒优化模型, 利用所述不确定数据集合与所述限制条件对所述优化模型进行优化, 以获取优化结果; 其中所述构建鲁棒优化模型, 利用所述不确定数据的确定性集合与所述限制条件对所述优化模型进行优化包括: 通过基于两阶段鲁棒优化的鲁棒规划问题对所述优化模型进行优化, 将优化问题分为两部分: 确定性优化模型和可行性检验。

10. 如权利要求 9 所述的装置, 其特征在于, 还包括:

策略模块, 用于通过所述优化结果对分布式储能进行投资分析。

配电网分布式储能投资优化方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及配电网分布式储能优化领域,具体而言,涉及一种配电网分布式储能投资优化方法及装置。

背景技术

[0002] 由于相关技术进步和减少电力系统对传统化石燃料发电机组依赖的突出优势,近年来可再生能源在能源供应中的比重有所增长。碳减排和气候变化问题日益引起关注,这是导致可再生能源推广到本地电网的主要驱动因素。然而,由于光伏发电(PVG)具有间歇性和可变性的特征,光伏发电(PVG)被认为是可预测性有限的能源。由于分布式可再生能源日益普及,不确定性和可变性对电力系统运行效率和运行可靠性提出了严峻的挑战。当大量PVG安装在配电网(DN)中时,会使得配电网运行的不确定性变得更严峻。

[0003] 传统上,配电系统是单向辐射状网络,将能量从上一级电网单向地传输到终端用户,其中电压通常是沿着长距离输电线路逐渐降落的。安装PVG后,配电网的功率流将变成双向的,随着PVG的输出波动,配电网节点会出现电压降落或电压抬升现象。虽然配电网中的传统电压控制设备(如自动电压调节器(AVR))可以提供本地无功功率补偿,但当PVG渗透率变大时,它们将达到其出力极限。此外,PVG的正向或负向功率引起的变电站超载。因此,包括电池,抽水蓄能,飞轮和压缩空气技术在内的分布式储能系统(DESS)为促进可再生能源的整合和配电网安全运行提供了一个可靠的解决方案。DESS作为有功功率的本地储能设备,能够提高DN的可靠性和效率。同时,这些可调度的存储设施还可以平抑间歇性可再生能源对配电网的馈入,从而减少峰值负荷,避免配电网扩容投资以及促进碳减排,从而提高电力系统的运营灵活性,为PVG投资者和客户提供额外的收益。针对投资者和电网运行者不同的风险承受能力,不同的科研人员提出了不同的配电网模型,并进行了论证。但是,现有的配电网模型大部分是基于确定框架生成的模型,面对PVG引起的不确定性,传统的确定性框架不再适用。

[0004] 因此,需要一种新的配电网分布式储能投资优化方法及装置。

[0005] 在所述背景技术部分公开的上述信息仅用于加强对本发明的背景的理解,因此它可以包括不构成对本领域普通技术人员已知的现有技术的信息。

发明内容

[0006] 有鉴于此,本发明提供一种配电网分布式储能投资优化方法及装置,能够提供稳健的分布式能源存储系统投资预估,同时对冲由光伏发电引起的不确定性。

[0007] 本发明的其他特性和优点将通过下面的详细描述变得显然,或部分地通过本发明的实践而习得。

[0008] 本发明提出一种配电网分布式储能投资优化方法,该方法包括:获取光伏发电系统的运行数据,通过多面体不确定集合量化所述运行数据,生成不确定数据的确定性集合;确定配电网潮流约束的优化模型的目标函数和限制条件;以及构建鲁棒优化模型,利用所

述数据集合与所述限制条件对所述数学模型进行优化,以获取优化结果。

[0009] 根据本发明的一方面,提出一种配电网分布式储能优化装置,该装置包括:数据模块,用于获取光伏发电系统的输出数据,集合模块,用于通过多面体不确定集合量化所述输出数据,生成不确定数据的确定性集合;模型模块,用于确定优化目标的数学模型;条件模块,用于获取所述数学模型的限制条件;以及优化模块,用于通过所述不确定数据集合与所述限制条件对所述数学模型进行优化,以获取优化结果。

[0010] 根据本发明的配电网分布式储能投资优化方法及装置,能够提供稳健的分布式能源存储系统投资预估,同时对冲由光伏发电引起的不确定性。

[0011] 应当理解的是,以上的一般描述和后文的细节描述仅是示例性的,并不能限制本发明。

附图说明

[0012] 通过参照附图详细描述其示例实施例,本发明的上述和其它目标、特征及优点将变得更加显而易见。下面描述的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域的普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0013] 图1是根据一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能投资优化方法的流程图。

[0014] 图2是根据一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能投资优化方法中的网络拓扑图。

[0015] 图3是根据一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能投资优化方法中的电压曲线图。

[0016] 图4是根据一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能投资优化方法中的电压剖面图。

[0017] 图5是根据另一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能投资优化方法中的电压曲线图。

[0018] 图6是根据另一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能投资优化方法中的电压剖面图。

[0019] 图7是根据一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能优化装置的框图。

具体实施方式

[0020] 现在将参考附图更全面地描述示例实施例。然而,示例实施例能够以多种形式实施,且不应被理解为限于在此阐述的实施例;相反,提供这些实施例使得本发明将全面和完整,并将示例实施例的构思全面地传达给本领域的技术人员。在图中相同的附图标记表示相同或类似的部分,因而将省略对它们的重复描述。

[0021] 此外,所描述的特征、结构或特性可以以任何合适的方式结合在一个或更多实施例中。在下面的描述中,提供许多具体细节从而给出对本发明的实施例的充分理解。然而,本领域技术人员将意识到,可以实践本发明的技术方案而没有特定细节中的一个或更多,或者可以采用其它的方法、组元、装置、步骤等。在其它情况下,不详细示出或描述公知方法、装置、实现或者操作以避免模糊本发明的各方面。

[0022] 附图中所示的方框图仅仅是功能实体,不一定必须与物理上独立的实体相对应。即,可以采用软件形式来实现这些功能实体,或在一个或多个硬件模块或集成电路中实现这些功能实体,或在不同网络和/或处理器装置和/或微控制器装置中实现这些功能实体。

[0023] 附图中所示的流程图仅是示例性说明,不是必须包括所有的内容和操作/步骤,也不是必须按所描述的顺序执行。例如,有的操作/步骤还可以分解,而有的操作/步骤可以合并或部分合并,因此实际执行的顺序有可能根据实际情况改变。

[0024] 分布式网络通常被认为是一个单向辐射状网络。每个节点j上的复杂的DN功率流可以通过现有技术中的分支流模型(BFM)来描述。为了将DEES(分布式储能系统),无功设备和可再生能源统一进上文的公式,本申请中做如下处理。

[0025] 图1是根据一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能投资优化方法的流程图。

[0026] 如图1所示,在S102中,获取光伏发电系统的运行数据。光伏发电系统的运行数据为正常运行中的光伏发电系统中的数据,该数据包含电压与功率等的波动范围。

[0027] 在S104中,通过多面体不确定集量化所述运行数据,生成不确定数据的确定性集合。集合如下:

$$[0028] \Xi_{us}(z_{r,t}^1, z_{r,t}^2) = \{U : U = [P_{r,t}^R]$$

$$[0029] P_{r,t}^R = (1 - z_{r,t}^1 - z_{r,t}^2)P_r^{R,AV} + z_{r,t}^1 P_r^{R,LB} + z_{r,t}^2 P_r^{R,UB}, \forall t \in T, \forall r \in \Phi_j^R$$

$$[0030] z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq 1, \forall t \in T, \forall r \in \Phi_j^R$$

$$[0031] \sum_{\forall t \in T} z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq \Gamma^{T_l}, r \in \Phi_j^R$$

$$[0032] \sum_{\forall c \in \Phi_j^R} z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq \Gamma^{Sp}, t \in T \quad \}$$

[0033] 其中, $\Xi_{us}(z_{r,t}^1, z_{r,t}^2)$ 为光伏发电系统不确定数据集合, $z_{r,t}^1, z_{r,t}^2$ 为辅助二进制变量, $P_{r,t}^R$ 为配电网中r节点在t时刻的真实光伏出力, $P_r^{R,AV}$ 为配电网中r节点平均光伏出力, $P_r^{R,LB}$ 与 $P_r^{R,UB}$ 为配电网在r节点的光伏出力的上限与下限。

[0034] 在S106中,确定配电网潮流约束的优化模型的目标函数和限制条件。可例如,优化目标的数学模型,包括:

$$[0035] \min \sum_{j \in J} \alpha_j Cap_j^s CC_s$$

[0036] 其中, α_j 为二进制变量,用来表征是否在该节点下的投资, $\alpha_j = 0$ 表示不投资, $\alpha_j = 1$ 表示投资, Cap_j^s 为分布式储能j节点的投资容量, CC_s 为储能投资成本。

[0037] 数学模型的限制条件,包括:确定功率潮流与电压限制条件;确定投资成本限制条件;确定网络运行限制条件;以及确定动态储能与容量相关限制条件,实时限制条件。

[0038] 其中,所述能流与电压限制条件包括以下公式:

$$[0039] P_{j,t} = \sum_{i \in \Omega_j} P_{i,t} + P_{j,t}^D - \sum_{r \in \Phi_j^R} P_{r,t}^R + P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dch}, \forall j \in J, \forall t \in T ;$$

$$[0040] Q_{j,t} = \sum_{i \in \Omega_j} Q_{i,t} + Q_{j,t}^D - \sum_{c \in \Phi_j^P} Q_{c,t}^P, \forall j \in J, \forall t \in T ;$$

[0041] $V_{j,t} = V_{i,t} + (r_{ij}P_{i,t} + x_{ij}Q_{i,t})$, $\forall j \in J, \forall i \in \Omega_j, \forall t \in T$;

[0042] $V_{j,t} = V_s, j=1, \forall t \in T$;

[0043] $1-\sigma \leq V_{j,t} \leq 1+\sigma, \forall j \in J, \forall t \in T$;

[0044] 其中, $P_{j,t}$ 为 j 节点在 t 时刻的有功潮流, $P_{j,t}^D$ 为 j 点在 t 时刻的负荷, $P_{r,t}^R$ 为 r 节点在 t 时刻的光伏机组出力, $P_{j,t}^{ch}$ 为 r 节点在 t 时刻的充电功率, $P_{j,t}^{dch}$ 为 r 节点在 t 时刻的放电功率, $Q_{j,t}$ 为 j 点在 t 时刻的无功潮流, $Q_{j,t}^D$ 为 j 节点在 t 时刻的无功负载需求, $Q_{c,t}^{rp}$ 为 c 节点在 t 时刻自动电压调节器的输出, $V_{j,t}$ 为 j 点在 t 时刻的电压, r_{ij} 与 x_{ij} 为 ij 线阻抗, V_s 为变电站电压, σ 为电压波动允许范围。

[0045] 其中, 所述投资成本限制条件包括以下公式:

[0046] $CC_j^s = \frac{z \cdot (1+z)^t}{cap_s \cdot ((1+z)^t - 1)} \cdot C_{inv}$;

[0047] $\sum_{j \in J} \alpha_j \leq N_s$;

[0048] $\sum_{j \in J} \alpha_j CC_j^s \leq CC_{sum}^s$;

[0049] 其中, α_j 为二进制变量, 用来表征是否在该节点下的投资, $\alpha_j = 0$ 表示不投资, $\alpha_j = 1$ 表示投资, Cap_j^s 为分布式储能 j 节点的投资容量, CC_s 为储能投资成本。

[0050] 其中, 所述网络运行限制条件包括以下公式:

[0051] $P_{min}^{sub} \leq P_{j,t} \leq P_{max}^{sub}, j=1, \forall t \in T$;

[0052] $-P_{ij}^{cap} \leq P_{i,t} \leq P_{ij}^{cap}, i \in \Omega_j, j \in J, \forall t \in T$;

[0053] $Q_{min}^{rp} \leq Q_{c,t}^{rp} \leq Q_{max}^{rp}, c \in \Phi_j^{rp}, \forall t \in T$;

[0054] 其中, P_{min}^{sub} 与 P_{max}^{sub} 为配电网接入变电站的有功功率的下限与上限, P_{ij}^{cap} 为 ij 线的容量, Q_{min}^{rp} 与 Q_{max}^{rp} 为自动电压调节器的输出下限与上限。

[0055] 其中, 所述动态储能与容量相关限制条件包括以下公式:

[0056] $E_{j,t} = E_{j,t-1} + (\eta_c P_{sj,t}^{ch} - \frac{1}{\eta_{dc}} P_{sj,t}^{dch}) \cdot \Delta t, j \in J, t \in T$;

[0057] $Cap_j^s \rho_{j,t}^{min} \leq E_{j,t} \leq Cap_j^s \rho_{j,t}^{max}, j \in J, t \in T$;

[0058] $E_{j,t} = Cap_j^s \cdot \rho_j^{ini}, j \in J, t = 0$;

[0059] $0 \leq P_{j,t}^{ch} \leq P_{ch}^{\max} \alpha_j^c, \forall j \in J, \forall t \in T$;

[0060] $0 \leq P_{j,t}^{dch} \leq P_{dch}^{\max} \alpha_j^d, \forall j \in J, \forall t \in T$;

[0061] $\alpha_j^c + \alpha_j^d \leq \alpha_j, j \in J$;

[0062] $\alpha_j, \alpha_j^c, \alpha_j^d \in \{0,1\}, j \in J$;

[0063] 其中, $E_{j,t}$ 为分布式储能中 j 点在 t 时刻的能量值, η_c 与 η_{dc} 为分布式储能充电与放电效率, $\rho_{j,t}^{min}$ 与 $\rho_{j,t}^{max}$ 为分布式储能中 j 节点在 t 时刻的最小与最大能量状态的百分比数值, ρ_j^{ini} 为 j 点初始能量状态的百分比数值, α_j^c 与 α_j^d 为代表分布式储能进行充放电的二进制变量。

[0064] 其中,所述实时限制条件包括以下公式:

$$[0065] \left(\max_{U \in \Xi_{us}(z_{c,t}^1, z_{c,t}^2)} \min_{M \in \Xi_{uc}(x_{st}^w)} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (S_{j,t}^{LV} + S_{j,t}^{UV}) + \sum_{t \in T} \sum_{j=1} (S_{j,t}^{LP} + S_{j,t}^{UP}) \right) = 0 ;$$

[0066] $S_{j,t}^{LV}$ 与 $S_{j,t}^{UV}$ 为电压限制条件的松弛变量, $S_{j,t}^{LP}$ 与 $S_{j,t}^{UP}$ 为变电站容量限制条件的松弛变量。

[0067] 在S108中,构建鲁棒优化模型,利用所述不确定数据集合与所述限制条件对所述优化模型进行优化,以获取优化结果。在本申请中,可例如,通过基于两阶段鲁棒优化的鲁棒规划问题对上述数学模型进行优化,并将优化问题分为两部分:确定性优化模型和可行性检验。第一阶段的变量作为“现在”的决定,这些决定是本申请中存储投资计划的考虑因素,在不确定性实现后不能调整。第二阶段的变量作为“观望”的决定,它是连续变量的可调值,可以在第一阶段对固定二元变量的不确定参数的任何实现作出响应。

[0068] 鲁棒优化公式如下:

$$[0069] \min \sum_{j \in J} \alpha_j Cap_j^s CC_s ;$$

[0070] 该优化公式的限制除了条件如上文所述的限制条件外,还包括:

$$[0071] \left(\max_{U \in \Xi_{us}(z_{c,t}^1, z_{c,t}^2)} \min_{M \in \Xi_{uc}(x_{st}^w)} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (S_{j,t}^{LV} + S_{j,t}^{UV}) + \sum_{t \in T} \sum_{j=1} (S_{j,t}^{LP} + S_{j,t}^{UP}) \right) = 0 .$$

[0072] 根据本发明的配电网分布式储能投资优化方法,通过多面体不确定集合建立带有光伏发电储能组件的配电网网络模型,并根据实际情况为模型提供限制条件,进而得到的优化模型的方式,能够真实反映带有光伏发电储能组件的配电网网络模型,并且依据此模型,提供稳健的分布式能源存储系统投资预估,同时对冲由光伏发电引起的不确定性影响。

[0073] 图2是根据一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能投资优化方法中的网络拓扑图。图2示例性的对通过所述优化结果对配电网分布式储能投资分析进行了描述。

[0074] 图2为37节点的配电网拓扑图。假设分别在节点720,728和735安装了三个光伏发电场,容量相等,分别使用到变电站不同距离的位置来体现位置变化。此外,在节点713,730和738组装了三个电压调节设施。这些电压调节设施连续可调,容量设置为1MVAR。节点799(Vs)即变电站的电压幅度假定为常数并设定为V0。可接受的电压波动范围设置为{0.95, 1.05} (p.u.) ;DN峰值负荷设定为:4.91MW/2.40MVAR。

[0075] 图2所述的示例中,每个节点日负荷变化可以通过将日负荷变化曲线与其尖峰负荷相乘得到,其中日负荷变化曲线在图3中给出。

[0076] 不确定性区间的上限/下限为{0.1, 0.9} × Phc,其中Phc为光伏发电的容量。设备1的利率z和年限成本分别设定为0.05和20。储能装置单位成本CCs为680\$/KWh。DESS的最大充/放电率定为其容量的40%。日常运营的初始能量状态被假定为其容量的35%。充电和放电效率为90%,整体的循环效率为81%。储存投资预算设定为500万美元。除变电站节点外的所有节点都被在DESS网络设置时被考虑到。

[0077] 不同级别的光伏发电渗透率将影响电网的规划方案和运营策略。为了说明PVG渗透率对DESS规划方案的影响,通过参考值λ来定义渗透水平:

$$[0078] \lambda = \frac{\sum_{r \in \Phi_j^R} P_r^h}{\sum_{j \in J} P_{j,peak}^D}$$

[0079] λ 描述了整个峰值PV(光伏电池)功率输出 $P_{j,peak}^D$ 与整体峰值负荷 P_r^h 之间的关系。

[0080] 在本实施例中,分别选择 $\lambda=0.75, 0.8, 0.85, 0.95$ 和1.0五个算例进行比较。本节DESS投资单位的容量设置为1.0MWh。

[0081] 表1不同情况下的DESS规划方案

算例	DESS 节点数量	总投资数额 (百万)	DESS 总容量 (MWh)	DESS 所在节点
[0082]	1	2	1.36	2.0 720,735
	2	2	1.36	2.0 705,735
	3	3	2.04	3.0 702,710,740
	4	6	4.08	6.0 701,734,710 736,735,741

[0083] 表1示出了DESS计划方案。可以看出,DESS的选址总体上是相似的,但是DESS的数量和总投资成本因情况而异。由于仿真系统的拓扑结构和PVG位置在所有光伏渗透率下都保持不变,所以在规划中DESS的位置是相似的。DESS应当对不确定的PVG输出进行局部补偿和平衡,以减少沿配电网支路的压降,从而保持配电网的电压在要求的波动范围。可以看出,随着光伏发电量的增加,需要更多的DESS投资来解决整个配电网系统的安全问题。

[0084] 通过本申请中的优化模型,投资计划人员可以很容易地改变投资单位的算法设置,以供实际情况中进行应用。

[0085] 为了更好地理解DESS的操作效果和所提出的模型,在最劣场景下,将本发明所提出的通过DESS调节DN的网络的方法和未使用DESS的DN的网络情况进行了对比。

[0086] 图3和图5描绘了如表1中算例3和算例4中所有节点的24小时电压剖面。可以看出,本申请所提出的模型通过控制电压波动使得电压总体情况优于基准数值。仿真结果表明,这两种算例下的电压波动发生在靠近光伏电站和网络尾端的节点。因此,越限电压最差的节点是变电站最远的PVG连接节点。从图4和图6中可以看出,在选择DESS和最佳运行策略的情况下,具有最坏电压越限的节点的电压分布被保持在限制范围内,并且电压波动被显著地减小。

[0087] 根据表1中的算例3,在另一个实施例中,本申请中的优化模型用于安装具有不同投资单位的DESS,分5个情况,DESS容量分别为:0.25MWh, 0.5MWh, 1.0MWh, 1.5MWh和2.0MWh。

[0088] 表2不同投资单位的仓储计划方案

DESS 容量 (MWh)	数量	总投资 (百万)	DESS 总容量 (MWh)	DESS 所在节点
[0089]	0.25	8	1.36	720,725,708,732 734,710,736,735
	0.5	5	1.70	702,720,728, 710,735
	1.0	3	2.04	702,710,740
	1.5	2	2.04	703,734
	2.0	2	2.72	736,741

[0090] 表2给出了相应的计划方案,包括投资成本,总DESS容量和DESS安置。仿真结果表明,DESS投资的数量随着最小DESS容量的增加而减少。DESS总投资成本也略有上升。当安装8个0.25MWh容量的存储设备时,投资成本最低(136万美元)。仿真结果还表明,有两个规划方案导致相同的投资成本:三个1.0兆瓦时单位和两个1.5兆瓦时单位。对于DESS节点,一般来说,结果中显示的首选位置要么靠近PVG节点,要么靠近叶节点。在5种情况下,DESS和投资解决DN运营问题的总容量不保持稳定,反映了小幅增长的趋势。

[0091] 通过鲁棒优化模型,利用所述不确定数据集合与所述限制条件对本实施例中的所述数学模型进行优化时,不同情况下优化的性能不同。随着PVG渗透水平的提高,计算时间也相应增加。大部分计算资源消耗在了大规模混合整数线性规划问题(MILP)的可行性检测过程中。

[0092] 本申请提出了一种稳健的配电网分布式储能投资优化方法,以维护DN运营安全。其目标是从DN运营商等集中决策者的角度对DESS进行投资,以避免实现PVG带来的任何不确定性。采用简化的分支流模型对配电网进行建模,从而得到全局最优解。为了更好地模拟事实,DESS被认为具有不同的额定功率和容量,取决于离散的投资规模。充分利用多面体不确定性集合对不确定性实现确定性建模,从而回避了依赖于概率分布函数的大规模场景生产过程。最后,该框架在数学上被表述为具有可行性检测的两阶段鲁棒优化问题,以在最劣场景下保证DN安全。最后通线性化方法来解决本申请中的优化问题。

[0093] 下述为本发明装置实施例,可以用于执行本发明方法实施例。对于本发明装置实施例中未披露的细节,请参照本发明方法实施例。

[0094] 图7是根据一示例性实施例示出的一种配电网分布式储能优化装置的框图。配电网分布式储能优化装置70包括:数据模块702,集合模块704,条件模块706,优化模块708。

[0095] 数据模块702用于获取光伏发电系统的输出数据。光伏发电系统的运行数据可例如包括:变电站容量限制,分支流量的限制,局部无功补偿装置的输出限制,每个光伏发电系统的时变状态能量,能量储存节点的能量等等。光伏发电系统的运行数据为常态光伏发电系统中的数据。

[0096] 集合模块704用于通过多面体不确定集量化所述输出数据,生成不确定数据的确定性集合;可例如不确定数据集合如下:

$$[0097] \Xi_{us}(z_{r,t}^1, z_{r,t}^2) = \{U : U = [P_{r,t}^R]$$

[0098] $P_{r,t}^R = (1 - z_{r,t}^1 - z_{r,t}^2)P_r^{R,AV} + z_{r,t}^1 P_r^{R,LB} + z_{r,t}^2 P_r^{R,UB}, \forall t \in T, \forall r \in \Phi_j^R$

[0099] $z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq 1, \forall t \in T, \forall r \in \Phi_j^R$

[0100] $\sum_{\forall t \in T} z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq \Gamma^T, r \in \Phi_j^R$

[0101] $\sum_{\forall c \in \Phi_j^R} z_{r,t}^1 + z_{r,t}^2 \leq \Gamma^{Sp}, t \in T \quad \}$;

[0102] 其中, $\Xi_{us}(z_{r,t}^1, z_{r,t}^2)$ 为光伏发电系统不确定数据集合, $z_{r,t}^1, z_{r,t}^2$ 为辅助二进制变量, $P_{r,t}^R$ 为配电网中 r 节点在 t 时刻的真实光伏出力, $P_r^{R,AV}$ 为配电网中 r 节点平均光伏出力, $P_r^{R,LB}$ 与 $P_r^{R,UB}$ 为配电网在 r 节点的光伏出力的上限与下限。

[0103] 条件模块 706 用于确定配电网潮流约束优化模型的目标函数和限制条件, 可例如, 优化目标的数学模型, 包括:

[0104] $\min \sum_{j \in J} \alpha_j Cap_j^s CC_s$

[0105] 其中, α_j 为二进制变量, 用来表征是否在该节点下的投资, $\alpha_j = 0$ 表示不投资, $\alpha_j = 1$ 表示投资, Cap_j^s 为分布式储能 j 节点的投资容量, CC_s 为储能投资成本。

[0106] 数学模型的限制条件, 包括: 确定功率潮流与电压限制条件; 确定投资成本限制条件; 确定网络运行限制条件; 以及确定动态储能与容量相关限制条件。

[0107] 其中, 所述能流与电压限制条件包括以下公式:

[0108] $P_{j,t} = \sum_{i \in \Omega_j} P_{i,t} + P_{j,t}^D - \sum_{r \in \Phi_j^R} P_{r,t}^R + P_{j,t}^{ch} - P_{j,t}^{dch}, \forall j \in J, \forall t \in T$;

[0109] $Q_{j,t} = \sum_{i \in \Omega_j} Q_{i,t} + Q_{j,t}^D - \sum_{c \in \Phi_j^P} Q_{c,t}^{rp}, \forall j \in J, \forall t \in T$;

[0110] $V_{j,t} = V_{i,t} + (r_{ij} P_{i,t} + x_{ij} Q_{i,t}), \forall j \in J, \forall i \in \Omega_j, \forall t \in T$;

[0111] $V_{j,t} = V_s, j = 1, \forall t \in T$;

[0112] $1 - \sigma \leq V_{j,t} \leq 1 + \sigma, \forall j \in J, \forall t \in T$;

[0113] 其中, $P_{j,t}$ 为 j 节点在 t 时刻的有功潮流, $P_{j,t}^D$ 为 j 点在 t 时刻的负荷, $P_{r,t}^R$ 为 r 节点在 t 时刻的光伏机组出力, $P_{j,t}^{ch}$ 为 r 节点在 t 时刻的充电功率, $P_{j,t}^{dch}$ 为 r 节点在 t 时刻的放电功率, $Q_{j,t}$ 为 j 点在 t 时刻的无功潮流, $Q_{j,t}^D$ 为 j 节点在 t 时刻的无功负载需求, $Q_{c,t}^{rp}$ 为 c 节点在 t 时刻自动电压调节器的输出, $V_{j,t}$ 为 j 点在 t 时刻的电压, r_{ij} 与 x_{ij} 为 ij 线阻抗, V_s 为变电站电压, σ 为电压波动允许范围。

[0114] 其中, 所述投资成本限制条件包括以下公式:

[0115] $CC_j^s = \frac{z \cdot (1+z)^\tau}{cap_s \cdot ((1+z)^\tau - 1)} \cdot C_{inv}$;

[0116] $\sum_{j \in J} \alpha_j \leq N_s$;

[0117] $\sum_{j \in J} \alpha_j CC_j^s \leq CC_{sum}^s$;

[0118] 其中, CC_j^s 为分布式储能年化投资成本, z 为年利率, τ 为设备寿命, C_{inv} 为分布式储

能投资成本, N_s 为分布式储能最大允许数量, CC_{sum}^s 为分布式储能最大投资总容量。

[0119] 其中, 所述网络运行限制条件包括以下公式:

$$[0120] P_{\min}^{sub} \leq P_{j,t} \leq P_{\max}^{sub}, j=1, \forall t \in T;$$

$$[0121] -P_{ij}^{cap} \leq P_{i,t} \leq P_{ij}^{cap}, i \in \Omega_j, j \in J, \forall t \in T;$$

$$[0122] Q_{\min}^{rp} \leq Q_{c,t}^{rp} \leq Q_{\max}^{rp}, c \in \Phi_j^{rp}, \forall t \in T;$$

[0123] 其中, P_{\min}^{sub} 与 P_{\max}^{sub} 为配电网接入变电站的有功功率的下限与上限, P_{ij}^{cap} 为 $i-j$ 线的容量, Q_{\min}^{rp} 与 Q_{\max}^{rp} 为自动电压调节器的输出下限与上限。

[0124] 其中, 所述动态储能与容量相关限制条件包括以下公式:

$$[0125] E_{j,t} = E_{j,t-1} + (\eta_c P_{sj,t}^{ch} - \frac{1}{\eta_{dc}} P_{sj,t}^{ch}) \cdot \Delta t, j \in J, t \in T;$$

$$[0126] Cap_j \rho_{j,t}^{\min} \leq E_{j,t} \leq Cap_j \rho_{j,t}^{\max}, j \in J, t \in T;$$

$$[0127] E_{j,0} = Cap_j \cdot \rho_j^{ini}, j \in J, t = 0;$$

$$[0128] 0 \leq P_{j,t}^{ch} \leq P_{ch}^{\max} \alpha_j^c, \forall j \in J, \forall t \in T;$$

$$[0129] 0 \leq P_{j,t}^{dch} \leq P_{dch}^{\max} \alpha_j^d, \forall j \in J, \forall t \in T;$$

$$[0130] \alpha_j^c + \alpha_j^d \leq \alpha_j, j \in J;$$

$$[0131] \alpha_j, \alpha_j^c, \alpha_j^d \in \{0,1\}, j \in J;$$

[0132] 其中, $E_{j,t}$ 为分布式储能中 j 点在 t 时刻的能量值, η_c 与 η_{dc} 为分布式储能充电与放电效率, $\rho_{j,t}^{\min}$ 与 $\rho_{j,t}^{\max}$ 为分布式储能中 j 节点在 t 时刻的最小与最大能量状态的百分比数值, ρ_j^{ini} 为 j 点初始能量状态的百分比数值, α_j^c 与 α_j^d 为代表分布式储能进行充放电的二进制变量。

[0133] 其中, 所述实时限制条件包括以下公式:

$$[0134] \left(\max_{U \in \Xi_{ub}(z_{c,t}^1, z_{c,t}^2)} \min_{M \in \Xi_{uc}(X_{c,t}^w)} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (S_{j,t}^{LV} + S_{j,t}^{UV}) + \sum_{t \in T} \sum_{j=1} (S_{j,t}^{LP} + S_{j,t}^{UP}) \right) = 0;$$

[0135] $S_{j,t}^{LV}$ 与 $S_{j,t}^{UV}$ 为电压限制条件的松弛变量, $S_{j,t}^{LP}$ 与 $S_{j,t}^{UP}$ 为变电站容量限制条件的松弛变量。

[0136] 优化模块708用于通过所述不确定数据集合与所述限制条件对所述数学模型进行优化, 以获取优化结果。在本申请中, 通过基于两阶段鲁棒优化的鲁棒规划问题对上述数学模型进行优化, 并将其分为两部分: 确定性优化模型和可行性检验。第一阶段的变量作为“现在”的决定, 这些决定是本文中存储投资计划的考虑因素, 在不确定性实现后不能调整。第二阶段的变量作为“观望”的决定, 它是连续变量的可调值, 可以在第一阶段对固定二元变量的不确定参数的任何变化实现作出响应。

[0137] 鲁棒优化公式可例如如下:

$$[0138] \min \sum_{j \in J} \alpha_j Cap_j^s CC_s;$$

[0139] 该优化公式的限制除了条件如上文所述的限制条件外, 还包括:

$$[0140] \left(\max_{U \in \Xi_{ub}(z_{c,t}^1, z_{c,t}^2)} \min_{M \in \Xi_{uc}(X_{c,t}^w)} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (S_{j,t}^{LV} + S_{j,t}^{UV}) + \sum_{t \in T} \sum_{j=1} (S_{j,t}^{LP} + S_{j,t}^{UP}) \right) = 0.$$

[0141] 该鲁棒优化问题的可通过C&CG算法求解。C&CG算法是一种两阶段鲁棒优化的高效分解算法,其布局是将原问题分解为主问题和子问题执行。所述C&CG算法求解,可例如包括:初始化参数,确定初始可行解 x^* ;对主要优化问题求解,获取第一解 x^*_1 ;将所述第一解带入次要优化问题中,使得 $O(x^*)$ 为最优目标函数值;判断收敛指数是否满足阈值,如果满足阈值则返回 x^* ;如果不满足阈值则重新对次要优化问题求解,并将最劣场景下的 u^* 作为对主要优化问题求解的截断参数。

[0142] 在本公开的一种示例性实施例中,还包括:策略模块(图中未示出),用于通过所述优化结果对分布式储能进行投资分析。

[0143] 根据本发明的配电网分布式储能优化装置,通过多面体不确定集合量建立带有光伏发电储能组件的配电网络模型,并根据实际情况为模型提供限制条件,进而得到的优化模型的方式,能够真实反映带有光伏发电储能组件的配电网络模型,并且依据此模型,提供稳健的分布式能源存储系统投资预估,同时对冲由光伏发电引起的不确定性影响。

[0144] 本领域技术人员可以理解上述各模块可以按照实施例的描述分布于装置中,也可以进行相应变化唯一不同于本实施例的一个或多个装置中。上述实施例的模块可以合并为一个模块,也可以进一步拆分成多个子模块。

[0145] 通过以上的实施例的描述,本领域的技术人员易于理解,这里描述的示例实施例可以通过软件实现,也可以通过软件结合必要的硬件的方式来实现。因此,根据本发明实施例的技术方案可以以软件产品形式体现出来,该软件产品可以存储在一个非易失性存储介质(可以是CD-ROM,U盘,移动硬盘等)中或网络上,包括若干指令以使得一台计算设备(可以是个人计算机、服务器、移动终端、或者网络设备等)执行根据本发明实施例的方法。

[0146] 以上具体地示出和描述了本发明的示例性实施例。应可理解的是,本发明不限于这里描述的详细结构、设置方式或实现方法;相反,本发明意图涵盖包含在所附权利要求的精神和范围内的各种修改和等效设置。

[0147] 此外,本说明书说明书附图所示出的结构、比例、大小等,均仅用以配合说明书所公开的内容,以供本领域技术人员了解与阅读,并非用以限定本公开可实施的限定条件,故不具技术上的实质意义,任何结构的修饰、比例关系的改变或大小的调整,在不影响本公开所能产生的技术效果及所能实现的目的下,均应仍落在本公开所公开的技术内容得能涵盖的范围内。同时,本说明书中所引用的如“上”、“第一”、“第二”及“一”等的用语,也仅为便于叙述的明了,而非用以限定本公开可实施的范围,其相对关系的改变或调整,在无实质变更技术内容下,当也视为本发明可实施的范畴。

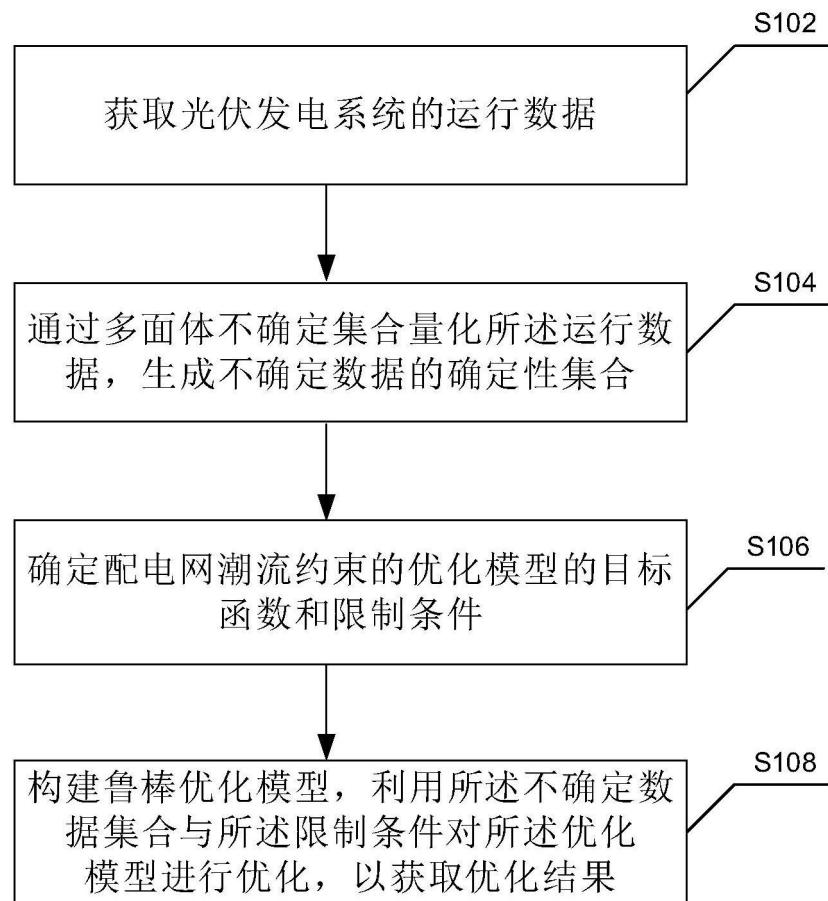
10

图1

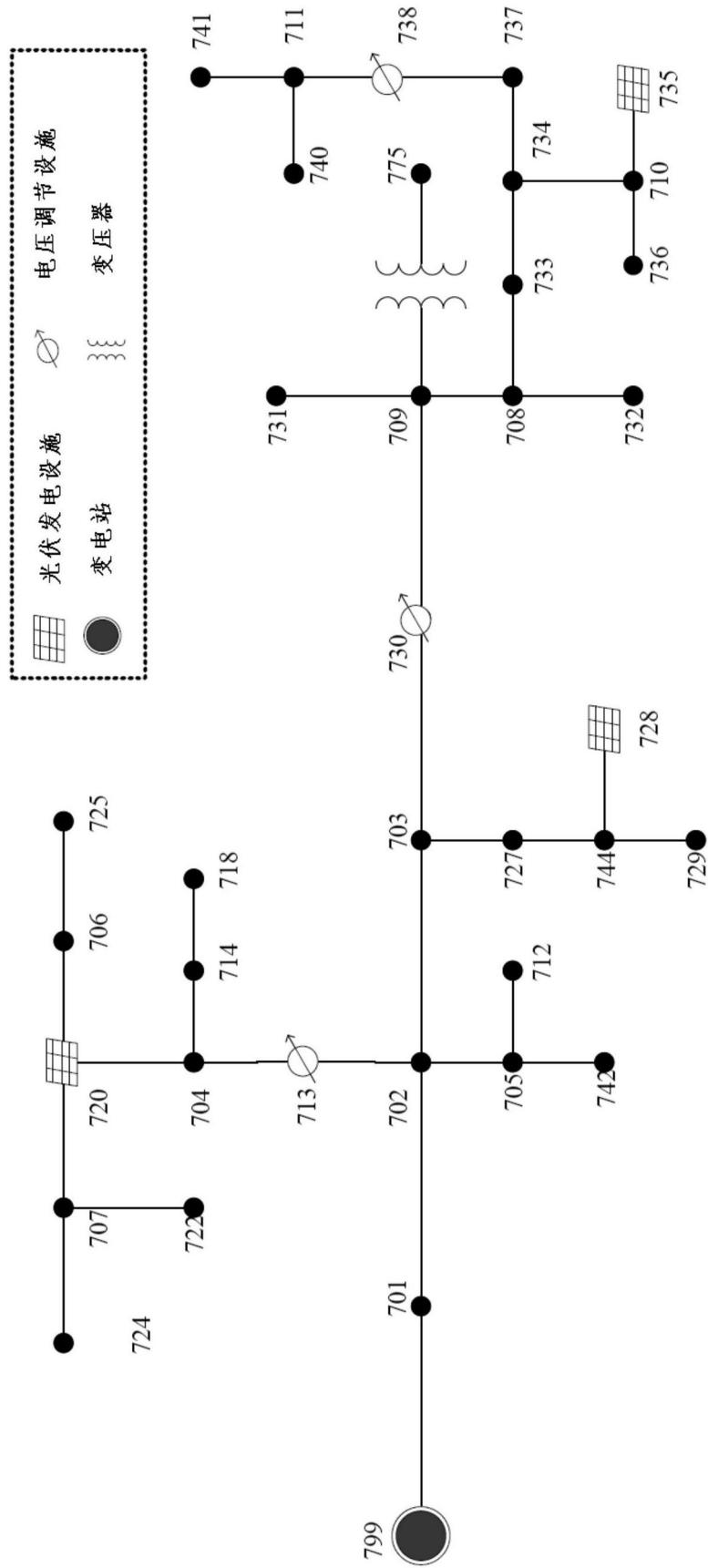


图2

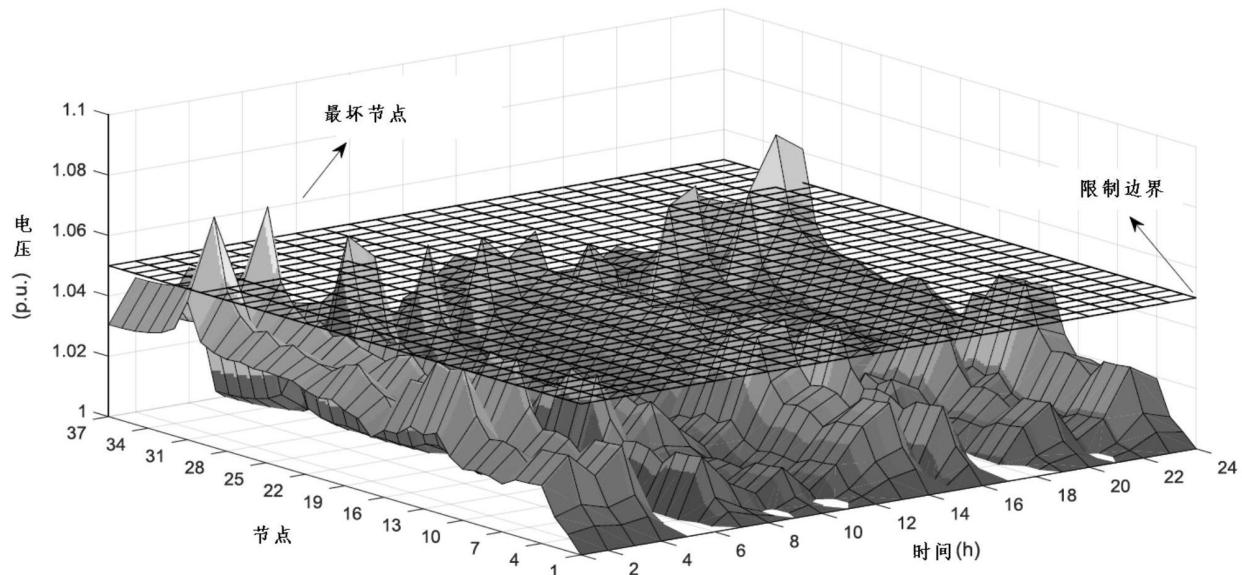


图3

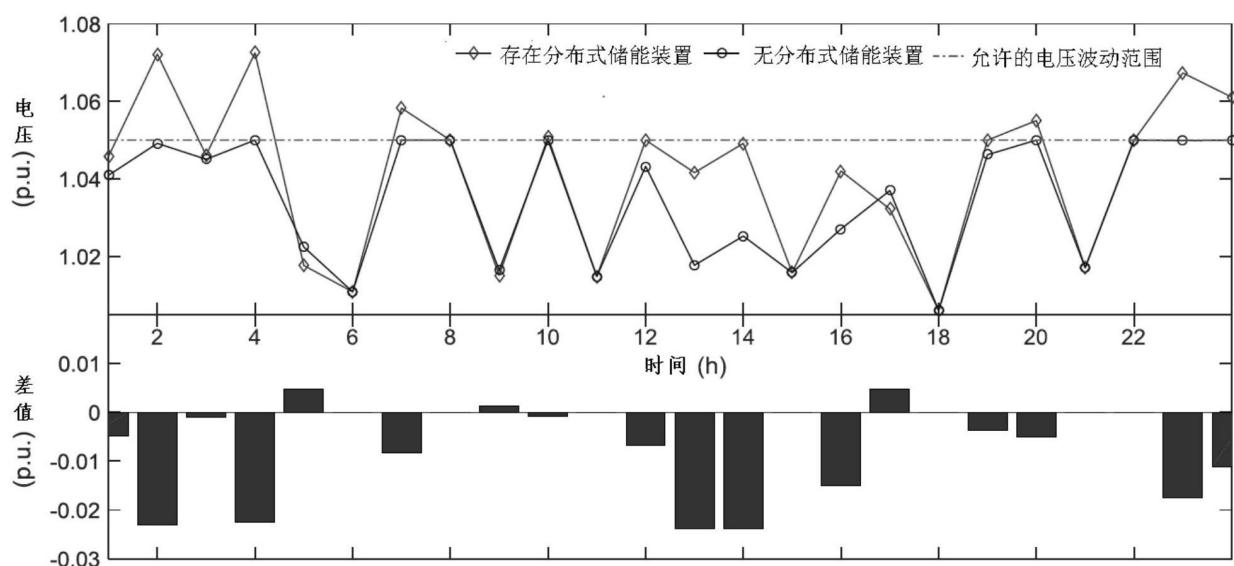


图4

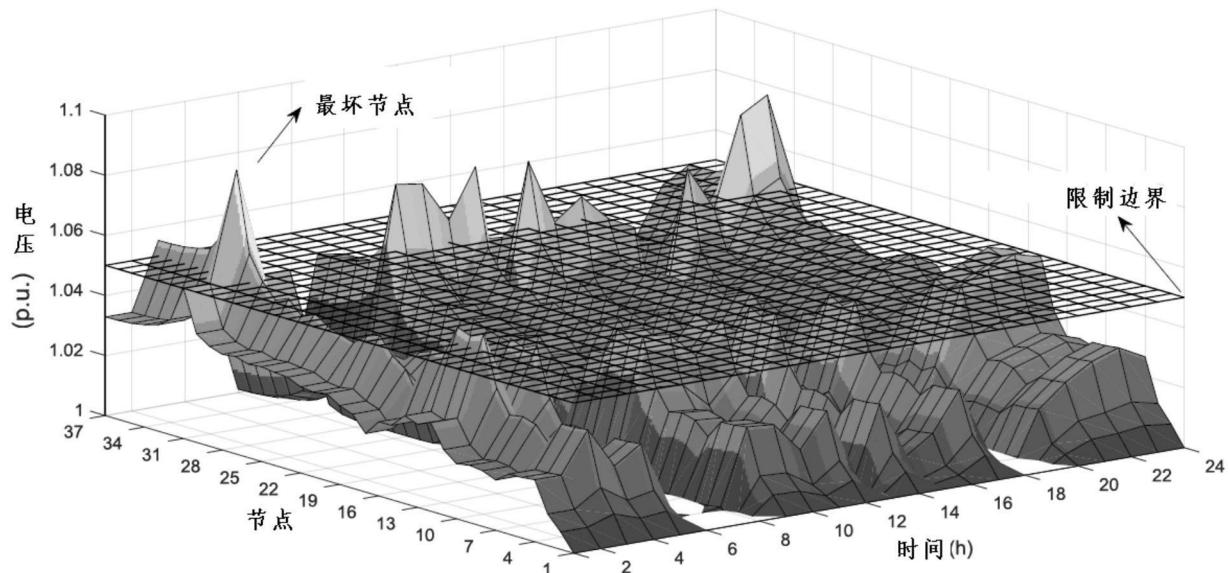


图5

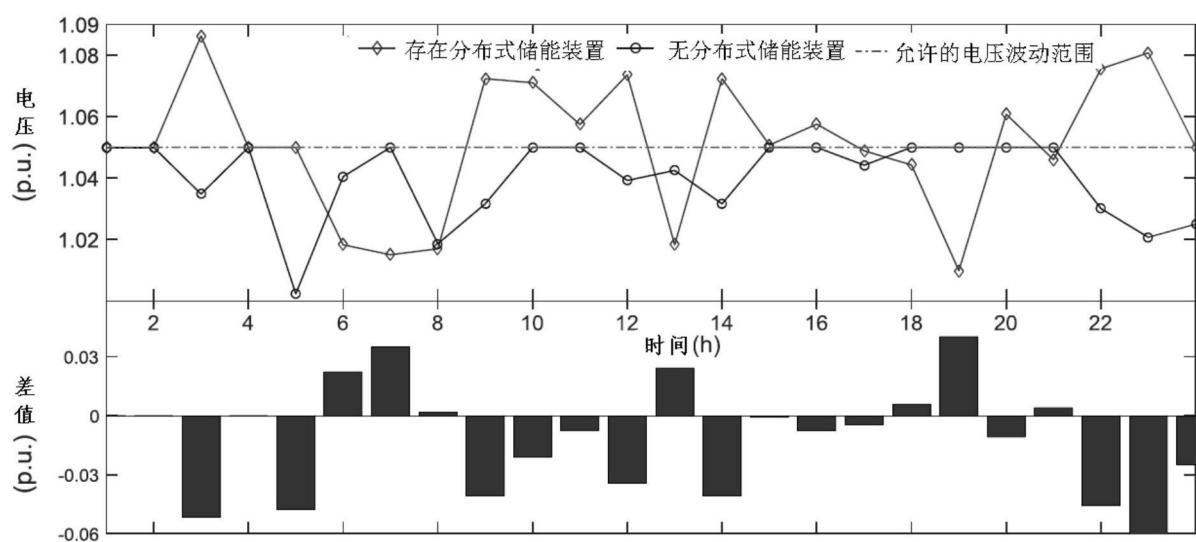


图6

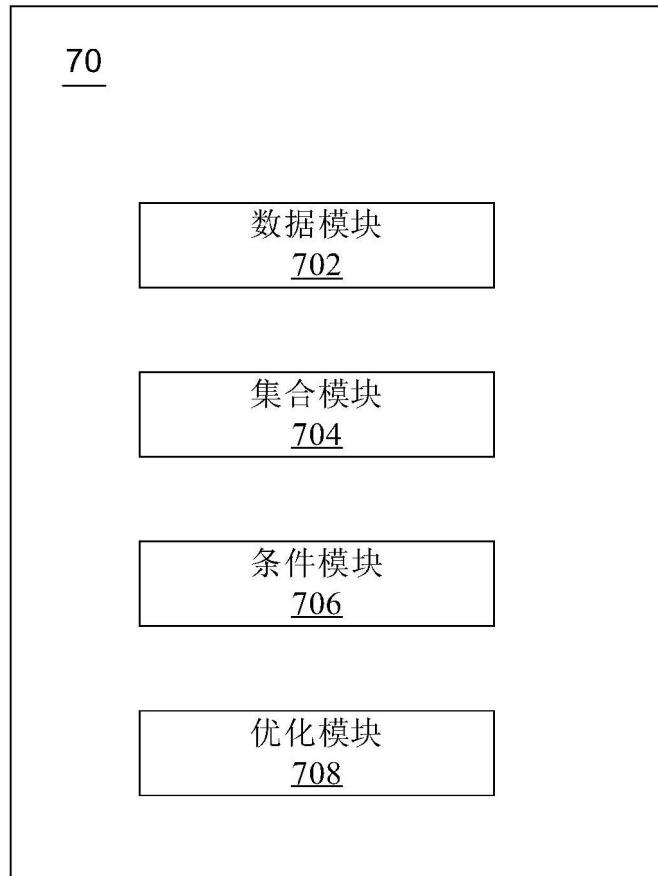


图7