



(10) 授权公告号 CN 118367562 B

(45) 授权公告日 2024. 08. 27

(21) 申请号 202410788384.1

G06F 17/10 (2006.01)

(22) 申请日 2024.06.19

G06Q 50/06 (2024.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

H02J 3/46 (2006.01)

申请公布号 CN 118367562 A

H02J 3/14 (2006.01)

H02J 3/32 (2006.01)

(43) 申请公布日 2024.07.19

(56) 对比文件

(73) 专利权人 国网上海市电力公司

CN 111342459 A, 2020.06.26

地址 200122 上海市浦东新区自由贸易试
验区源深路1122号

CN 111541248 A, 2020.08.14

审查员 严科慧

(72) 发明人 余玉良 张钊 张雪原 孙颖

杨义 蔡思烨 顾小旭 杨恩龙

(74) 专利代理机构 北京天达知识产权代理事务
所有限公司 11386

专利代理师 侯永帅

(51) Int. Cl.

H02J 3/06 (2006.01)

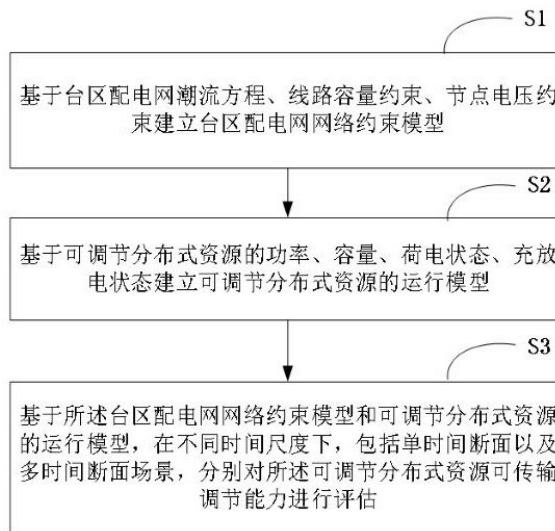
权利要求书4页 说明书15页 附图2页

(54) 发明名称

一种考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法

(57) 摘要

本发明涉及一种考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法,属于分布式资源调节技术领域,包括:基于台区配电网潮流方程、线路容量约束、节点电压约束建立台区配电网网络约束模型;基于可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型;基于所述网络约束模型和运行模型在不同时间尺度下对可调节分布式资源可传输调节能力进行评估。本发明通过考虑线路容量、节点电压等网络约束建立台区配电网网络约束条件,基于配电网网络约束模型和分布式资源运行特性对分布式资源可传输调节能力进行评估,提高了其调节能力评估的准确性,为台区配电网安全、经济运行提供了有力的技术支撑。



1.一种考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

基于台区配电网潮流方程、线路容量约束、节点电压约束建立台区配电网网络约束模型;

基于可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型;

基于所述台区配电网网络约束模型和可调节分布式资源的运行模型,在不同时间尺度下,包括单时间断面以及多时间断面场景,分别对所述可调节分布式资源可传输调节能力进行评估;

基于所述台区配电网网络约束模型、可调节分布式资源的运行模型、单时间断面场景目标函数构建第一最优潮流模型,基于第一最优潮流模型评估单时间断面场景下的可传输调节能力上限和下限;

基于所述台区配电网网络约束模型、可调节分布式资源的运行模型、多时间断面场景目标函数构建第二最优潮流模型,基于第二最优潮流模型评估多时间断面场景下的可传输调节能力上限和下限;

以最大化配电网分布式资源总消耗功率为单时间断面场景上调能力目标函数,对单时间断面场景上调能力目标函数添加配电网网损项作为惩罚项得到评估配电网单时间断面分布式资源可传输调节能力上限的第一最优潮流模型;

以最小化配电网分布式资源总消耗功率为单时间断面场景下调能力目标函数,对单时间断面场景下调能力目标函数添加配电网网损项作为惩罚项得到评估配电网单时间断面分布式资源可传输调节能力下限的第一最优潮流模型;

以最大化配电网分布式资源消耗功率之和为多时间断面场景上调能力目标函数,对多时间断面场景上调能力目标函数添加配电网网损项作为惩罚项得到评估配电网多时间断面分布式资源可传输调节能力上限的第二最优潮流模型;

以最小化配电网分布式资源消耗功率之和为多时间断面场景下调能力目标函数,对多时间断面场景下调能力目标函数添加配电网网损项作为惩罚项得到评估配电网多时间断面分布式资源可传输调节能力下限的第二最优潮流模型。

2.根据权利要求1所述的考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法,其特征在于,所述基于台区配电网潮流方程、线路容量约束、节点电压约束建立台区配电网网络约束模型包括:

通过智能终端量测设备获取台区配电网节点电压、有功功率、无功功率;

根据网络运行安全约束条件设置台区配电网线路容量的上限、节点电压的上限及下限;

基于获取的台区配电网节点电压、有功功率、无功功率,根据Distflow模型建立台区配电网网络约束模型;所述台区配电网网络约束模型包括:配电网线路潮流约束条件、线路容量约束条件、节点电压约束条件;

将配电网线路潮流约束中非线性约束条件通过二阶锥松弛转化为二阶锥约束条件,使非线性规划的最优潮流问题转化为锥规划问题。

3.根据权利要求1所述的考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估

方法,其特征在于,所述基于可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型,包括:

通过智能终端量测设备获取可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态;所述可调节分布式资源包括储能、电动汽车;

根据实际运行约束设置可调节分布式资源的最大充电功率、最大放电功率、荷电状态的下限、荷电状态的上限;

基于获取的可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型;所述可调节分布式资源的运行模型包括:可调节分布式资源功率约束条件、可调节分布式资源荷电状态约束条件、可调节分布式资源SOC与可调节分布式资源功率的关系约束条件、可调节分布式资源SOC与可调节分布式资源充放电功率关系的约束条件。

4. 根据权利要求1所述的考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法,其特征在于,所述配电网网络约束模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_m(t) = V_i(t) - 2(R_{im}P_{im}(t) + X_{im}Q_{im}(t)) + (R_{im}^2 + X_{im}^2)l_{im}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L \\ P_{Gi}(t) - P_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} P_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (P_{ni}(t) - R_{ni}l_{im}(t)) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\ Q_{Gi}(t) - Q_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} Q_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (Q_{ni}(t) - X_{ni}l_{im}(t)) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\ l_{im}(t) \leq \frac{|S_{im}(t)|^2}{U_{base}^2} \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L \\ V_i(t) = |U_i(t)|^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\ [(2P_{im}(t))^2 + (2Q_{im}(t))^2 + (l_{im}(t) - V_i(t))^2] \leq (l_{im}(t) + V_i(t))^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L \end{array} \right. \quad (21),$$

其中, R_{im} 代表对应线路的电阻值, $P_{im}(t)$ 代表线路 (i,m) 有功功率值, X_{im} 代表对应线路的电抗值, $Q_{im}(t)$ 代表线路 (i,m) 无功功率值, $P_{Gi}(t)$ 代表对应节点发出的有功功率, $P_{Li}(t)$ 代表对应节点消耗的有功功率, $P_{ni}(t)$ 代表线路 (n,i) 有功功率值, R_{ni} 代表线路 (n,i) 电阻值, $Q_{Gi}(t)$ 代表对应节点发出的无功功率, $Q_{Li}(t)$ 代表对应节点消耗的无功功率, $Q_{ni}(t)$ 代表线路 (n,i) 无功功率值, X_{ni} 代表线路 (n,i) 电抗值, $|S_{im}(t)|$ 代表对应线路视在功率的上限, U_{base} 代表配电网的基准电压, $|U_i(t)|$ 代表对应节点复电压的模值, T 代表时间点数量, N 代表线路节点数量, L 代表线路集合, l_{im} 、 $V_m(t)$ 、 $V_i(t)$ 为中间变量。

5. 根据权利要求4所述的考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法,其特征在于,通过下述方法得到可调节分布式资源的运行模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{SOC}_{s,i} \leq SOC_{s,i}(t) \leq \overline{SOC}_{s,i} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ P_{s,i}(t) = P_{ch,i}(t) - P_{dch,i}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ 0 \leq P_{ch,i}(t) \leq P_{ch,i}^{\max} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ 0 \leq P_{dch,i}(t) \leq P_{dch,i}^{\max} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ SOC_i(t) = SOC_i(t-1) + \eta_{ch} P_{ch,i}(t) \Delta t / E_i^{\max} \\ \quad - P_{dch,i}(t) \Delta t / (\eta_{dch} E_i^{\max}) \quad t=2,3,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ P_{ch,i}(t) \leq z_i(t) P_{ch,i}^{\max} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ P_{dch,i}(t) \leq (1 - z_i(t)) P_{dch,i}^{\max} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ z_i(t) \in \{0,1\} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \end{array} \right. \quad (34),$$

其中, $SOC_{s,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的SOC, $\overline{SOC}_{s,i}$ 代表可调节分布式资源SOC的上限, $\underline{SOC}_{s,i}$ 代表可调节分布式资源SOC的下限, $P_{s,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的功率, $P_{ch,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的充电功率, $P_{dch,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的放电功率, $P_{ch,i}^{\max}$ 代表可调节分布式资源的充电功率上限, $P_{dch,i}^{\max}$ 代表可调节分布式资源的放电功率上限, $SOC_i(t)$ 代表t时刻可调节分布式资源i的SOC值, $SOC_i(t-1)$ 代表t-1时刻可调节分布式资源i的SOC值, η_{ch} 为可调节分布式资源充电效率, Δt 为时间步长, $E_i^{\max}$ 为可调节分布式资源总电能容量, η_{dch} 为可调节分布式资源放电效率, $z_i(t)$ 为变量, N_s 代表可调节分布式资源的数量。

6. 根据权利要求5所述的考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法, 其特征在于, 所述评估配电网单时间断面分布式资源可传输调节能力上限的第一最优潮流模型为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t_0) - P_{Li}(t_0)) + k \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t_0) \\ \text{s.t.} \quad & (21), (34), (35), (36) \end{aligned}$$

$$S_{Gi}(t) = S_{pv,i}(t) + S_{dch,i}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (35)$$

$$S_{Li}(t) = S_{load,i}(t) + S_{ch,i}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (36),$$

其中, k 代表惩罚项的惩罚系数, $S_{pv,i}(t)$ 为节点i的光伏发电功率, $S_{dch,i}(t)$ 为节点i

的可调节分布式资源放电复功率, $S_{load,i}(t)$ 为节点i的负荷充电复功率, $S_{ch,i}(t)$ 为节点i的可调节分布式资源充电复功率, $S_{Gi}(t)$ 为节点i的总发出复功率, $S_{Li}(t)$ 为节点i的总消耗复功率;

所述评估配电网单时间断面分布式资源可传输调节能力下限的第一最优潮流模型为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t_0) - P_{Gi}(t_0)) + k \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t_0) \\ \text{s.t.} \quad & (21), (34), (35), (36) \end{aligned}$$

7. 根据权利要求6所述的考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法, 其特征在于, 所述评估配电网多时间断面分布式资源可传输调节能力上限的第二最优潮流模型为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t) - P_{Li}(t)) + k \sum_{t=1}^T \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t) \\ \text{s.t.} \quad & (21), (34), (35), (36), (42) \\ & \sum_{i \in N_g} (P_{ch,i}(t_m) - P_{dch,i}(t_m)) = \sum_{i \in N_g} (P_{ch,i}(t_n) - P_{dch,i}(t_n)), \forall t_m, t_n \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (42); \end{aligned}$$

所述评估配电网多时间断面分布式资源可传输调节能力下限的第二最优潮流模型为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t) - P_{Gi}(t)) + k \sum_{t=1}^T \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t) \\ \text{s.t.} \quad & (21), (34), (35), (36), (42) \end{aligned}$$

一种考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力 评估方法

技术领域

[0001] 本发明涉及分布式资源调节技术领域,尤其涉及一种考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法。

背景技术

[0002] 随着分布式新能源如光伏、风电大规模接入电网,台区配电网安全运行面临着电压越限、线路过载的挑战。而可调节的分布式资源(如储能系统)因其能灵活调节的特性,可为台区配电网提供优化调节服务,缓解分布式新能源波动的影响。因此,准确评估分布式资源在台区配电网中的灵活调节能力,对于提升电网灵活性和可再生能源消纳能力、保障电网安全稳定运行至关重要。

[0003] 然而现有技术评估分布式资源灵活调节能力时没有充分考虑台区配电网实际运行时面临的线路容量、节点电压等网络约束条件,从而在对分布式资源调节能力进行评估时不够精准。

[0004] 由于电网网络拓扑结构和线路容量、节点电压实际运行约束条件的限制,分布式资源的调节能力无法完全传输至电网的各个区域。因此,在台区配电网实际运行环境下,考虑台区配电网网络约束对分布式资源的可传输调节能力进行评估,揭示其在网络约束条件下传输的影响机理成为尚待解决的关键技术问题。

发明内容

[0005] 鉴于上述的分析,本发明旨在提供一种考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法,用以解决现有分布式资源调节能力评估方法没有充分考虑台区配电网实际运行时面临的线路容量、节点电压网络约束条件,导致分布式资源调节能力评估准确性低的问题。

[0006] 本发明提供了一种考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法,所述方法包括以下步骤:

[0007] 基于台区配电网潮流方程、线路容量约束、节点电压约束建立台区配电网网络约束模型;

[0008] 基于可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型;

[0009] 基于所述台区配电网网络约束模型和可调节分布式资源的运行模型,在不同时间尺度下,包括单时间断面以及多时间断面场景,分别对所述可调节分布式资源可传输调节能力进行评估。

[0010] 进一步地,所述基于台区配电网潮流方程、线路容量约束、节点电压约束建立台区配电网网络约束模型包括:

[0011] 通过智能终端量测设备获取台区配电网节点电压、有功功率、无功功率;

[0012] 根据网络运行安全约束条件设置台区配电网线路容量的上限、节点电压的上限及下限；

[0013] 基于获取的台区配电网节点电压、有功功率、无功功率,根据Distflow模型建立台区配电网网络约束模型;所述台区配电网网络约束模型包括:配电网线路潮流约束条件、线路容量约束条件、节点电压约束条件;

[0014] 将配电网线路潮流约束中非线性约束条件(18)通过二阶锥松弛转化为二阶锥约束条件,使非线性规划的最优潮流问题转化为锥规划问题。

[0015] 进一步地,所述基于可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型,包括:

[0016] 通过智能终端量测设备获取可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态;所述可调节分布式资源包括储能、电动汽车;

[0017] 根据实际运行约束设置可调节分布式资源的最大充电功率、最大放电功率、荷电状态的下限、荷电状态的上限;

[0018] 基于获取的可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型;所述可调节分布式资源的运行模型包括:可调节分布式资源功率约束条件、可调节分布式资源荷电状态约束条件、可调节分布式资源SOC与可调节分布式资源功率的关系约束条件、可调节分布式资源SOC与可调节分布式资源充放电功率关系的约束条件。

[0019] 进一步地,基于所述台区配电网网络约束模型、可调节分布式资源的运行模型、单时间断面场景目标函数构建第一最优潮流模型,基于第一最优潮流模型评估单时间断面场景下的可传输调节能力上限和下限;

[0020] 基于所述台区配电网网络约束模型、可调节分布式资源的运行模型、多时间断面场景目标函数构建第二最优潮流模型,基于第二最优潮流模型评估多时间断面场景下的可传输调节能力上限和下限。

[0021] 进一步地,所述配电网网络约束模型为:

$$[0022] \quad \begin{cases} V_m(t) = V_i(t) - 2(R_{im}P_{im}(t) + X_{im}Q_{im}(t)) + (R_{im}^2 + X_{im}^2)l_{im}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L \\ P_{Gi}(t) - P_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} P_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (P_{ni}(t) - R_{ni}l_{in}(t)) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\ Q_{Gi}(t) - Q_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} Q_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (Q_{ni}(t) - X_{ni}l_{in}(t)) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\ l_{im}(t) \leq \frac{[S_{im}(t)]^2}{U_{base}^2} \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L \\ V_i(t) = |U_i(t)|^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\ [(2P_{im}(t))^2 + (2Q_{im}(t))^2 + (l_{im}(t) - V_i(t))^2] \leq (l_{im}(t) + V_i(t))^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L \end{cases} \quad (21),$$

[0023] 其中, R_{im} 代表对应线路的电阻值, $P_{im}(t)$ 代表线路(i,m)有功功率值, X_{im} 代表对应线路的电抗值, $Q_{im}(t)$ 代表线路(i,m)无功功率值, $P_{Gi}(t)$ 代表对应节点发出的有功功率,

$P_{Li}(t)$ 代表对应节点消耗的有功功率, $P_{ni}(t)$ 代表线路(n,i)有功功率值, R_{ni} 代表线路(n,i)电阻值, $Q_{Gi}(t)$ 代表对应节点发出的无功功率, $Q_{Li}(t)$ 代表对应节点消耗的无功功率, $Q_{ni}(t)$ 代表线路(n,i)无功功率值, X_{ni} 代表线路(n,i)电抗值, $\overline{S_{im}(t)}$ 代表对应线路视在功率的上限, U_{base} 代表配电网的基准电压, $|U_i(t)|$ 代表对应节点复电压的模值, T 代表时间点数量, N 代表线路节点数量, L 代表线路集合, l_{im} 、 $V_m(t)$ 、 $V_i(t)$ 为中间变量。

[0024] 进一步地,通过下述方法得到可调节分布式资源的运行模型:

$$[0025] \quad \begin{cases} \underline{SOC}_{s,i} \leq SOC_{s,i}(t) \leq \overline{SOC}_{s,i} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ P_{s,i}(t) = P_{ch,i}(t) - P_{dch,i}(t) & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ 0 \leq P_{ch,i}(t) \leq P_{ch,i}^{max} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ 0 \leq P_{dch,i}(t) \leq P_{dch,i}^{max} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ SOC_i(t) = SOC_i(t-1) + \eta_{ch} P_{ch,i}(t) \Delta t / E_i^{max} & \\ -P_{dch,i}(t) \Delta t / (\eta_{dch} E_i^{max}) & t=2,3,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ P_{ch,i}(t) \leq z_i(t) P_{ch,i}^{max} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ P_{dch,i}(t) \leq (1-z_i(t)) P_{dch,i}^{max} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\ z_i(t) \in \{0,1\} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \end{cases} \quad (34),$$

[0026] 其中, $SOC_{s,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的SOC, $\overline{SOC}_{s,i}$ 代表可调节分布式资源SOC的上限, $\underline{SOC}_{s,i}$ 代表可调节分布式资源SOC的下限, $P_{s,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的功率, $P_{ch,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的充电功率, $P_{dch,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的放电功率, $P_{ch,i}^{max}$ 代表可调节分布式资源的充电功率上限, $P_{dch,i}^{max}$ 代表可调节分布式资源的放电功率上限, $SOC_i(t)$ 代表t时刻可调节分布式资源i的SOC值, $SOC_i(t-1)$ 代表t-1时刻可调节分布式资源i的SOC值, η_{ch} 为可调节分布式资源充电效率, Δt 为时间步长, E_i^{max} 为可调节分布式资源总电能容量, η_{dch} 为可调节分布式资源放电效率, $z_i(t)$ 为变量, N_s 代表可调节分布式资源的数量。

[0027] 进一步地,以最大化配电网分布式资源总消耗功率为单时间断面场景上调能力目标函数,对单时间断面场景上调能力目标函数添加配电网网损项作为惩罚项得到评估配电

网单时间断面分布式资源可传输调节能力上限的第一最优潮流模型；

[0028] 以最小化配电网分布式资源总消耗功率为单时间断面场景下调能力目标函数,对单时间断面场景下调能力目标函数添加配电网网损项作为惩罚项得到评估配电网单时间断面分布式资源可传输调节能力下限的第一最优潮流模型。

[0029] 进一步地,所述评估配电网单时间断面分布式资源可传输调节能力上限的第一最优潮流模型为:

$$[0030] \quad \min \sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t_0) - P_{Li}(t_0)) + k \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t_0)$$

$$\text{s.t. (21),(34),(35),(36)}$$

$$[0031] \quad S_{Gi}(t) = S_{pv,i}(t) + S_{dch,i}(t) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (35)$$

$$[0032] \quad S_{Li}(t) = S_{load,i}(t) + S_{ch,i}(t) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (36),$$

[0033] 其中, k 代表惩罚项的惩罚系数, $S_{pv,i}(t)$ 为节点 i 的光伏放电复功率, $S_{dch,i}$ 为节点 i 的可调节分布式资源放电复功率, $S_{load,i}(t)$ 为节点 i 的负荷充电复功率, $S_{ch,i}(t)$ 为节点 i 的可调节分布式资源充电复功率, $S_{Gi}(t)$ 为节点 i 的总发出复功率, $S_{Li}(t)$ 为节点 i 的总消耗复功率;

[0034] 所述评估配电网单时间断面分布式资源可传输调节能力下限的第一最优潮流模型为:

$$[0035] \quad \min \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t_0) - P_{Gi}(t_0)) + k \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t_0) \quad \circ$$

$$\text{s.t. (21),(34),(35),(36)}$$

[0036] 进一步地,以最大化配电网分布式资源消耗功率之和为多时间断面场景上调能力目标函数,对多时间断面场景上调能力目标函数添加配电网网损项作为惩罚项得到评估配电网多时间断面分布式资源可传输调节能力上限的第二最优潮流模型;

[0037] 以最小化配电网分布式资源消耗功率之和为多时间断面场景下调能力目标函数,对多时间断面场景下调能力目标函数添加配电网网损项作为惩罚项得到评估配电网多时间断面分布式资源可传输调节能力下限的第二最优潮流模型。

[0038] 进一步地,所述评估配电网多时间断面分布式资源可传输调节能力上限的第二最优潮流模型为:

$$[0039] \quad \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t) - P_{Li}(t)) + k \sum_{t=1}^T \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t);$$

$$\text{s.t. (21),(34),(35),(36),(42)}$$

$$[0040] \quad \sum_{i \in N_s} (P_{ch,i}(t_m) - P_{dch,i}(t_m)) = \sum_{i \in N_s} (P_{ch,i}(t_n) - P_{dch,i}(t_n)), \forall t_m, t_n \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (42);$$

[0041] 所述评估配电网多时间断面分布式资源可传输调节能力下限的第二最优潮流模

型为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t) - P_{Gi}(t)) + k \sum_{t=1}^T \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t) \\ \text{s.t.} \quad & (21), (34), (35), (36), (42) \end{aligned}$$

[0043] 与现有技术相比,本发明至少可实现如下有益效果之一:

[0044] 1、本发明通过台区配电网潮流方程、实际线路容量、节点电压约束建立台区配电网网络约束条件,使在此基础上建立的分布式资源可传输调节能力优化评估模型,综合考虑了台区配电网实际运行时面临的网络约束条件,从而提高了分布式资源调节能力评估的准确性。

[0045] 2、本发明通过功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行约束条件,使在此基础上建立的分布式资源可传输调节能力评估模型符合分布式资源运行特性,从而提高了分布式资源调节能力评估的准确性。

[0046] 3、本发明通过在不同时间尺度下,包括单时间断面以及多时间断面场景,单时间断面场景用于提供快速的功率支撑,多时间断面场景用于提供一段持续时间内的削峰、填谷服务,分别对分布式资源可传输调节能力进行评估,提高了分布式资源调节能力评估的准确性,揭示了其在网络约束条件下传输的影响机理,为台区配电网安全、经济运行提供了有力的技术支撑。

[0047] 本发明中,上述各技术方案之间还可以相互组合,以实现更多的优选组合方案。本发明的其他特征和优点将在随后的说明书中阐述,并且,部分优点可从说明书中变得显而易见,或者通过实施本发明而了解。本发明的目的和其他优点可通过说明书以及附图中所特别指出的内容中来实现和获得。

附图说明

[0048] 附图仅用于示出具体实施例的目的,而并不认为是对本发明的限制,在整个附图中,相同的参考符号表示相同的部件;

[0049] 图1为本发明实施例考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法的流程图;

[0050] 图2为本发明实施例测试系统拓扑结构的示意图;

[0051] 图3为本发明实施例单时间断面调节能力上下限节点电压及线路视在功率的示意图;

[0052] 图4为本发明实施例多时间断面调节能力上下限节点电压及线路视在功率的示意图。

具体实施方式

[0053] 下面结合附图来具体描述本发明的优选实施例,其中,附图构成本申请一部分,并与本发明的实施例一起用于阐释本发明的原理,并非用于限定本发明的范围。

[0054] 本发明的一个具体实施例,公开了一种考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法。如图1所示,该方法包括以下步骤:

[0055] 步骤S1、基于台区配电网潮流方程、线路容量约束、节点电压约束建立台区配电网网络约束模型；

[0056] 步骤S2、基于可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型；

[0057] 步骤S3、基于所述台区配电网网络约束模型和可调节分布式资源的运行模型，在不同时间尺度下，包括单时间断面以及多时间断面场景，分别对所述可调节分布式资源可传输调节能力进行评估。

[0058] 具体的，步骤S1中，所述基于台区配电网潮流方程、线路容量约束、节点电压约束建立台区配电网网络约束模型包括：

[0059] 通过智能终端量测设备获取台区配电网节点电压、有功功率、无功功率；

[0060] 根据网络运行安全约束条件设置台区配电网线路容量的上限、节点电压的上限及下限；

[0061] 基于获取的台区配电网节点电压、有功功率、无功功率，根据Distflow模型建立台区配电网网络约束模型；所述台区配电网网络约束模型包括：配电网线路潮流约束条件、线路容量约束条件、节点电压约束条件；

[0062] 将配电网线路潮流约束中非线性约束条件通过二阶锥松弛转化为二阶锥约束条件，使非线性规划的最优潮流问题转化为锥规划问题。

[0063] 具体的，作为电力系统的关键组成部分，台区配电网负责将电能从配电变压器传输至终端用户。典型的台区配电网包括变压器、配电线路、负荷、可调节分布式资源和分布式电源等元件，呈现出复杂的网络拓扑结构。在实际运行中，台区配电网面临下述约束条件：

[0064] (1) 配电网线路潮流约束：节点注入的有功功率、无功功率以及节点电压之间满足潮流方程；

[0065] (2) 配电网安全运行约束：包括线路容量约束以及节点电压约束；所述线路容量约束要求各线路视在功率不超过额定容量，所述节点电压约束要求节点电压幅值位于节点电压上下限之间。

[0066] 可以理解的，当负荷需求或分布式电源出力超过线路容量时，会导致线路过载，甚至引发严重事故，因此建立线路容量约束。为确保台区配电网安全稳定运行，各节点电压必须保持在合理的运行范围内，过高或过低的电压均可能导致设备损坏、电能质量下降，存在安全隐患，因此建立节点电压约束。

[0067] 具体的，对于包含N个母线节点的配电网，设其所有线路(i, j)组成线路集合L，通过如下方法建立网络支路潮流模型：

$$[0068] \quad U_i(t) - U_m(t) = Z_{im} \left(\frac{S_{im}(t)}{U_i} \right)^* \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

$$[0069] \quad S_{Gi}(t) - S_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} S_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (S_{ni}(t) - Z_{ni} \frac{S_{ni}^2(t)}{|U_i(t)|^2}) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (2)$$

[0070] 式中， $U_i(t)$ 、 $U_m(t)$ 代表对应节点的复电压， Z_{im} 、 Z_{ni} 代表对应线路的复阻抗，

$S_{im}(t)$ 代表对应线路的复功率, $*$ 代表复数的共轭运算, t 代表对应时间节点, $S_{Gi}(t)$ 代表对应节点发出的复功率, $S_{Li}(t)$ 代表对应节点消耗的复功率, $|U_i(t)|$ 代表对应节点复电压的模值, $S_{im}(t)$ 代表i节点流向m节点的复功率, $S_{ni}(t)$ 代表n节点流向i节点的复功率, $\mathbf{T}$ 代表时间节点数量, $\mathbf{N}$ 代表配电网的节点数量。

[0071] 上式 (3)、(4) 中的复电压、复功率和复阻抗的表达式如下所示:

$$[0072] \quad U_i(t) = |U_i(t)| \angle \theta_i \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (3)$$

$$[0073] \quad S_{Gi}(t) = P_{Gi}(t) + jQ_{Gi}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (4)$$

$$[0074] \quad S_{Li}(t) = P_{Li}(t) + jQ_{Li}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (5)$$

$$[0075] \quad Z_{im} = R_{im} + jX_{im} \quad \forall (i,m) \in L \quad (6)$$

[0076] 式中, $\angle \theta_i$ 代表对应节点电压的相角, $P_{Gi}(t)$ 代表对应节点发出的有功功率, $P_{Li}(t)$ 代表对应节点消耗的有功功率, $Q_{Gi}(t)$ 代表对应节点发出的无功功率, $Q_{Li}(t)$ 代表对应节点消耗的无功功率, R_{im} 代表对应线路的电阻值, X_{im} 代表对应线路的电抗值, $\mathbf{L}$ 代表配电网的线路集合。

[0077] 对式 (1) 基于DistFlow模型进行电压相角松弛, 并将复功率约束拆分为实部有功功率约束和虚部无功功率约束, 得到以下潮流方程:

$$[0078] \quad |U_m(t)|^2 = |U_i(t)|^2 - 2(R_{im}P_{im}(t) + X_{im}Q_{im}(t)) + (R_{im}^2 + X_{im}^2) \frac{P_{im}^2(t) + Q_{im}^2(t)}{|U_i(t)|^2} \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall (i,m) \in L \quad (7)$$

$$[0079] \quad P_{Gi}(t) - P_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} P_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (P_{ni}(t) - R_{ni} \frac{P_{ni}^2(t) + Q_{ni}^2(t)}{|U_i(t)|^2}) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (8)$$

$$[0080] \quad Q_{Gi}(t) - Q_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} Q_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (Q_{ni}(t) - X_{ni} \frac{P_{ni}^2(t) + Q_{ni}^2(t)}{|U_i(t)|^2}) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (9)$$

[0081] 式中, $P_{im}(t)$ 代表线路 (i,m) 上有功功率, $Q_{im}(t)$ 代表线路 (i,m) 上无功功率, $P_{ni}(t)$ 代表线路 (n,i) 上有功功率, $Q_{ni}(t)$ 代表线路 (n,i) 的无功功率, R_{ni} 代表线路 (n,i) 的电阻值, X_{ni} 代表线路 (n,i) 的电抗值。

[0082] 需要说明的是, 线路采用元组形式表示, 线路 (i,m) 表示节点i和节点m之间的线路。

[0083] 考虑配电网安全运行约束 (包括线路容量约束以及节点电压约束), 节点电压约束如下式所示:

[0084] $\left| \underline{U_i} \right| \leq \left| U_i(t) \right| \leq \left| \overline{U_i} \right|, t=1,2,\dots,T \quad j=1,2,\dots,N$ (10)

[0085] 其中, $\left| \overline{U_i} \right|$ 代表对应节点电压幅值的上限, $\left| \underline{U_i} \right|$ 代表对应节点电压幅值的下限。

[0086] 线路容量约束如下式所示:

[0087] $\left| S_{im}(t) \right| \leq \left| \overline{S_{im}(t)} \right|, t=1,2,\dots,T \quad \forall (i,m) \in L$ (11)

[0088] 其中, $\left| S_{im}(t) \right|$ 代表对应线路的视在功率, $\left| \overline{S_{im}(t)} \right|$ 代表对应线路的视在功率上限。

[0089] 对于以上潮流方程 (7)、(8)、(9), 对其非线性部分做以下变量代换:

[0090] $V_i(t) = \left| U_i(t) \right|^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N$ (12)

[0091] $l_{im}(t) = \frac{P_{im}^2(t) + Q_{im}^2(t)}{V_i(t)} \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall (i,m) \in L$ (13)

[0092] 通过下述公式得到经式 (12)、(13) 变量代换后的配电网线路潮流约束:

[0093] $V_m(t) = V_i(t) - 2(R_{im}P_{im}(t) + X_{im}Q_{im}(t)) + (R_{im}^2 + X_{im}^2)l_{im}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall (i,m) \in L$ (14)

[0094] $P_{Gi}(t) - P_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} P_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (P_{ni}(t) - R_{ni}l_{im}(t)) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N$ (15)

[0095] $Q_{Gi}(t) - Q_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} Q_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (Q_{ni}(t) - X_{ni}l_{im}(t)) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N$ (16)

[0096] 通过下述公式得到经式 (12) 变量代换后的节点电压约束:

[0097] $\left| \underline{U_i} \right|^2 \leq V_i(t) \leq \left| \overline{U_i} \right|^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad j=1,2,\dots,N$ (17)

[0098] 利用配电网基准电压将线路容量约束近似为:

[0099] $l_{im}(t) \leq \frac{\left| \overline{S_{im}(t)} \right|^2}{U_{base}^2} \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall (i,m) \in L$ (18)

[0100] 式中, U_{base} 代表配电网的基准电压。

[0101] 考虑在以上网络约束模型中剩余的非线性约束 (13)

$l_{im}(t)V_i(t) = P_{im}^2(t) + Q_{im}^2(t)$, 对其进行二阶锥松弛, 得到下式:

[0102] $l_{im}(t)V_i(t) \geq P_{im}^2(t) + Q_{im}^2(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall (i,m) \in L$ (19)

[0103] 将式 (19) 整理为典型二阶锥约束条件:

[0104] $[(2P_{im}(t))^2 + (2Q_{im}(t))^2 + (l_{im}(t) - V_i(t))^2] \leq (l_{im}(t) + V_i(t))^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall (i,m) \in L$ (20)

[0105] 式中, $P_{im}(t)$ 代表线路 (i,m) 的有功功率, $Q_{im}(t)$ 代表线路 (i,m) 的无功功率。

[0106] 基于以上处理,可得到配电网网络约束模型如下:

$$\begin{cases}
 V_m(t) = V_i(t) - 2(R_{im}P_{im}(t) + X_{im}Q_{im}(t)) + (R_{im}^2 + X_{im}^2)l_{im}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L \\
 P_{Gi}(t) - P_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} P_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (P_{ni}(t) - R_{ni}l_{in}(t)) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\
 Q_{Gi}(t) - Q_{Li}(t) = \sum_{m:i \rightarrow m} Q_{im}(t) - \sum_{n:n \rightarrow i} (Q_{ni}(t) - X_{ni}l_{in}(t)) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\
 l_{im}(t) \leq \frac{|S_{im}(t)|^2}{U_{base}^2} \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L \\
 V_i(t) = |U_i(t)|^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \\
 [(2P_{im}(t))^2 + (2Q_{im}(t))^2 + (l_{im}(t) - V_i(t))^2] \leq (l_{im}(t) + V_i(t))^2 \quad t=1,2,\dots,T \quad \forall(i,m) \in L
 \end{cases} \quad (21)$$

[0108] 可以理解的,由于约束条件(13)为非线性约束,为使台区配电网网络约束模型可被常用商业求解器求解,需要对其进行二阶锥松弛处理。上述约束条件构成了所述台区配电网网络约束条件,本发明通过台区配电网潮流方程、线路容量约束、节点电压网络约束建立台区配电网网络约束模型,使在此基础上建立的分布式资源可传输调节能力优化评估模型综合考虑了台区配电网实际运行时面临的网络约束条件,从而提高了分布式资源调节能力评估的准确性。

[0109] 具体的,步骤S2中,所述基于可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型,包括:

[0110] 通过智能终端量测设备获取可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态;所述可调节分布式资源包括储能、电动汽车;

[0111] 根据实际运行约束设置可调节分布式资源的最大充电功率、最大放电功率、荷电状态的下限、荷电状态的上限;

[0112] 基于获取的可调节分布式资源的功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行模型;所述可调节分布式资源的运行模型包括:可调节分布式资源功率约束条件、可调节分布式资源荷电状态(SOC)约束条件、可调节分布式资源SOC与可调节分布式资源功率的关系约束条件、可调节分布式资源SOC与可调节分布式资源充放电功率关系的约束条件。

[0113] 可调节分布式资源功率约束条件表示如下:

$$\underline{P}_{s,i} \leq P_{s,i}(t) \leq \overline{P}_{s,i} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (22)$$

[0115] 式中, $P_{s,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的功率, $\overline{P}_{s,i}$ 代表可调节分布式资源功率的上限, $\underline{P}_{s,i}$ 代表可调节分布式资源功率的下限, N_s 代表可调节分布式资源的数量。

[0116] 可调节分布式资源SOC约束条件表示如下:

$$\underline{SOC}_{s,i} \leq SOC_{s,i}(t) \leq \overline{SOC}_{s,i} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (23)$$

[0118] 式中, $SOC_{s,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的SOC, $\overline{SOC}_{s,i}$ 代表可调节分布式资源

SOC的上限, $SOC_{s,i}$ 代表可调节分布式资源SOC的下限。

[0119] 在引入充电、放电效率的情况下,可调节分布式资源SOC与可调节分布式资源功率关系的约束条件表示如下:

$$[0120] \quad SOC_{s,i}(t) = SOC_{s,i}(t-1) + \eta_{ch} P_{s,i}(t) \Delta t / E_i^{max} \quad i=1,2,\dots,N_s, \text{ if } P_{s,i}(t) \geq 0 \quad (24)$$

$$[0121] \quad SOC_{s,i}(t) = SOC_{s,i}(t-1) + P_{s,i}(t) \Delta t / (\eta_{dch} E_i^{max}) \quad i=1,2,\dots,N_s, \text{ if } P_{s,i}(t) < 0 \quad (25)$$

[0122] 式中, η_{ch} 为可调节分布式资源充电效率, η_{dch} 为可调节分布式资源放电效率, E_i^{max} 为可调节分布式资源总电能容量, Δt 为时间步长。

[0123] 为处理在式 (24)、(25) 中由充放电效率引入的非线性,将可调节分布式资源功率替换为充电功率和放电功率的形式:

$$[0124] \quad P_{s,i}(t) = P_{ch,i}(t) - P_{dch,i}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (26)$$

[0125] 式中, $P_{ch,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的充电功率, $P_{dch,i}(t)$ 代表可调节分布式资源的放电功率。

[0126] 在充电、放电功率形式下,可调节分布式资源功率的约束条件表示为:

$$[0127] \quad 0 \leq P_{ch,i}(t) \leq P_{ch,i}^{max} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (27)$$

$$[0128] \quad 0 \leq P_{dch,i}(t) \leq P_{dch,i}^{max} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (28)$$

[0129] 式中, $P_{ch,i}^{max}$ 代表可调节分布式资源的充电功率上限, $P_{dch,i}^{max}$ 代表可调节分布式资源的放电功率上限。

[0130] 可调节分布式资源SOC与可调节分布式资源充放电功率关系的约束条件表示为:

$$[0131] \quad SOC_i(t) = SOC_i(t-1) + \eta_{ch} P_{ch,i}(t) \Delta t / E_i^{max} - P_{dch,i}(t) \Delta t / (\eta_{dch} E_i^{max}) \quad t=2,3,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (29)$$

[0132] 式中, $SOC_i(t-1)$ 代表 $t-1$ 时刻可调节分布式资源 i 的SOC值, $SOC_i(t)$ 代表 t 时刻可调节分布式资源 i 的SOC值。

[0133] 同时,对于引入的可调节分布式资源充电、放电功率变量,需满足以下约束条件,保证充电、放电功率中至少有一个为0:

$$[0134] \quad P_{ch,i}(t) P_{dch,i}(t) = 0 \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (30)$$

[0135] 对于式 (30) 引入的非线性约束,通过引入0-1变量 $z_i(t)$,将其变换为混合整数约束:

$$[0136] \quad P_{ch,i}(t) \leq z_i(t) P_{ch,i}^{max} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (31)$$

$$[0137] \quad P_{dch,i}(t) \leq (1 - z_i(t)) P_{dch,i}^{max} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (32)$$

$$[0138] \quad z_i(t) \in \{0,1\} \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (33)$$

[0139] 基于以上处理,可得到可调节分布式资源的运行模型如下:

$$\begin{cases}
\overline{SOC_{s,i}} \leq SOC_{s,i}(t) \leq \overline{SOC_{s,i}} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\
P_{s,i}(t) = P_{ch,i}(t) - P_{dch,i}(t) & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\
0 \leq P_{ch,i}(t) \leq P_{ch,i}^{max} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\
0 \leq P_{dch,i}(t) \leq P_{dch,i}^{max} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\
SOC_i(t) = SOC_i(t-1) + \eta_{ch} P_{ch,i}(t) \Delta t / E_i^{max} & \\
-P_{dch,i}(t) \Delta t / (\eta_{dch} E_i^{max}) & t=2,3,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\
P_{ch,i}(t) \leq z_i(t) P_{ch,i}^{max} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\
P_{dch,i}(t) \leq (1-z_i(t)) P_{dch,i}^{max} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s \\
z_i(t) \in \{0,1\} & t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N_s
\end{cases} \quad (34)$$

[0141] 可以理解的,上述约束条件构成了可调节分布式资源的运行约束条件,本发明通过功率、容量、荷电状态、充放电建立可调节分布式资源的运行约束条件,使在此基础上建立的分布式资源可传输调节能力优化评估模型符合分布式资源运行特性,从而提高了分布式资源调节能力评估的准确性。

[0142] 具体的,步骤S3中,所述基于所述台区配电网网络约束模型和可调节分布式资源的运行模型,在单时间断面场景下对所述可调节分布式资源可传输调节能力进行评估包括:

[0143] 基于所述台区配电网网络约束模型、可调节分布式资源的运行模型、单时间断面场景目标函数构建第一最优潮流模型,基于第一最优潮流模型评估单时间断面场景下的可传输调节能力上限和下限。

[0144] 具体的,考虑电网需要配电网提供较短时间功率支撑的场景,即单时间断面场景,对所述可调节分布式资源可传输调节能力进行评估,即评估其可提供的最大上调能力和最大下调能力。所述最大上调能力为配电网功率上限对应的可调分布式资源调节量,所述最大下调能力为配电网功率下限对应的可调分布式资源调节量。考虑一个包含光伏、负荷、可调节分布式资源的配电网。对于上述配电网分布式资源类型,各节点注入功率模型如下:

$$[0145] \quad S_{Gi}(t) = S_{pv,i}(t) + S_{dch,i}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (35)$$

$$[0146] \quad S_{Li}(t) = S_{load,i}(t) + S_{ch,i}(t) \quad t=1,2,\dots,T \quad i=1,2,\dots,N \quad (36)$$

[0147] 式中, $S_{pv,i}(t)$ 为节点i的光伏放电复功率, $S_{dch,i}$ 为节点i的可调节分布式资源放电复功率, $S_{load,i}(t)$ 为节点i的负荷充电复功率, $S_{ch,i}(t)$ 为节点i的可调节分布式资源充电复功率, $S_{Gi}(t)$ 为节点i的总发出复功率, $S_{Li}(t)$ 为节点i的总消耗复功率。

[0148] 以最大化配电网分布式资源总消耗功率为目标函数,评估单时间断面场景可传输调节能力上限,即最大可传输上调能力:

$$[0149] \quad \max \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t_0) - P_{Gi}(t_0)) \quad (37)$$

[0150] 式中, t_0 为该时间断面对应时刻。上式等价于:

$$[0151] \quad \min \sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t_0) - P_{Li}(t_0)) \quad (38)$$

[0152] 由于本申请对配电网约束条件式 (13) 进行了二阶锥松弛, 为使松弛后求解二阶锥松弛得到的解位于松弛前问题的可行域中, 需对以上目标函数式 (38) (43) 添加与线路功率呈单调递增关系的惩罚项, 本申请以配电网网损项作为惩罚项, 从而得到评估配电网单时间断面可传输上调能力的第一最优潮流模型:

$$[0153] \quad \min \sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t_0) - P_{Li}(t_0)) + k \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t_0) \quad (39)$$

s.t. (21), (34), (35), (36)

[0154] 式中, k 代表惩罚项设置的惩罚系数。

[0155] 以最小化配电网分布式资源消耗功率为目标函数, 即最小化可调节分布式资源的总功率输出, 评估单时间断面场景可传输调节能力下限, 即最大可传输下调能力:

$$[0156] \quad \min \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t_0) - P_{Gi}(t_0)) \quad (40)$$

[0157] 同理, 为使松弛后求解得到的解位于松弛前问题的可行域中, 对以上目标函数 (40) 添加网损项作为惩罚项, 从而得到评估配电网可传输下调能力的第一最优潮流模型:

$$[0158] \quad \min \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t_0) - P_{Gi}(t_0)) + k \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t_0) \quad (41)$$

s.t. (21), (34), (35), (36)

[0159] 可以理解的, 针对单个时间断面场景, 当有功功率从电网流向台区配电网时, 台区有功功率视为正值; 台区有功功率增加视为向上调节 (上调), 台区有功功率下降视为向下调节 (下调)。通过商业求解器求解第一最优潮流模型 (39)、(41), 即可得到在单时间断面场景下配电网分布式资源可传输调节能力的上限值与下限值。

[0160] 进一步地, 所述基于所述台区配电网网络约束模型和可调节分布式资源的运行模型, 在多时间断面场景下对所述可调节分布式资源可传输调节能力进行评估包括:

[0161] 基于所述台区配电网网络约束模型、可调节分布式资源的运行模型、多时间断面场景目标函数构建第二最优潮流模型, 基于第二最优潮流模型评估多时间断面场景下的可传输调节能力上限和下限。

[0162] 具体的, 考虑上级电网需要台区配电网提供未来一段时间 T 内恒定的持续削峰或填谷服务, 即多时间断面场景, 对所述可调节分布式资源可传输调节能力进行评估, 即评估其可提供的最大上调能力和最大下调能力。

[0163] 考虑配电网的削峰/填谷服务由可调节分布式资源提供, 则需保证可调节分布式资源在时间 T 内提供恒定的削峰值/填谷值, 满足以下约束:

$$[0164] \quad \sum_{i \in N_g} (P_{ch,i}(t_m) - P_{dch,i}(t_m)) = \sum_{i \in N_g} (P_{ch,i}(t_n) - P_{dch,i}(t_n)), \forall t_m, t_n \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (42)$$

[0165] 式中, N_g 代表可调节分布式资源接入的节点集合。

[0166] 具体的, 假设 T 时段内包含 n 个时间点, 时间点间隔为 Δt 。所述最大可传输上调能力指配电网分布式资源在所述 T 时段内所有时间点的输出功率之和的最大值对应的可调分布式资源调节功率, 所述最大可传输下调能力指可调节分布式资源在所述 T 时段内所有时间点的功率输出之和的最小值对应的可调分布式资源调节功率。

[0167] 以最大化配电网分布式资源消耗功率之和为目标函数, 评估多时间断面场景可传输调节能力上限, 即最大可传输上调能力:

$$[0168] \quad \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t) - P_{Gi}(t)) \quad (43)$$

[0169] 上式等价于:

$$[0170] \quad \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t) - P_{Li}(t)) \quad (44)$$

[0171] 添加网损相关的惩罚项, 使松弛后求解到的解位于松弛前问题可行域中, 得到评估配电网多时间断面可传输上调能力的第二最优潮流模型:

$$[0172] \quad \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t) - P_{Li}(t)) + k \sum_{t=1}^T \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t) \quad (45)$$

s.t. (21), (34), (35), (36), (42)

[0173] 以最小化配电网分布式资源消耗功率之和为目标函数, 评估多时间断面场景可传输调节能力下限, 即最大可传输下调能力:

$$[0174] \quad \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t) - P_{Gi}(t)) \quad (46)$$

[0175] 同理, 添加网损相关的惩罚项, 使松弛后求解到的解位于松弛前问题可行域中, 得到评估配电网多时间断面可传输下调能力的第二最优潮流模型:

$$[0176] \quad \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{Li}(t) - P_{Gi}(t)) + k \sum_{t=1}^T \sum_{(i,m) \in L} R_{im} l_{im}(t) \quad (47)$$

s.t. (21), (34), (35), (36), (42)

[0177] 通过求解第二最优潮流模型即可得到多时间断面场景下配电网分布式资源可传输调节能力的上限值与下限值。

[0178] 示例性的, 测试系统的拓扑结构基于 IEEE 13 节点标准测试系统构建, 如图2所示。其中, 光伏 (分布式可再生能源) 连接到节点3和5, 负载连接到节点2、7、8、10、12和13, 储能系统 (可调分布式资源) 连接到节点4、6、9和11。各线路的视在功率容量限制如表1所示, 储能系统的功率和容量限制如表2所示。其中, 节点1被设定为平衡节点, 其电压为 1.0 p.u.; 其他节点的电压限制为 1.05 p.u. (上限) 和 0.95 p.u. (下限) 之间。其中, 线路采用元组形

式表示,如(1,2)表示节点1和节点2之间的线路。

[0179] 表1 各线路的视在功率容量限制

	线路	容量/kVA
[0180]	(1,2),(2,7)	1000
	(2,3),(3,4),(2,5),(5,6),(7,8)	400
	(8,9),(7,10),(10,11),(7,12),(10,13)	

[0181] 表2 储能系统的功率和容量限制

	节点	功率上限/kW	容量上限/kWh
[0182]	4,6	200	400
	9,11	100	200

[0183] 光伏输出曲线由Python仿真生成,模拟出12:00至13:55期间的典型光伏输出,时间步长设为15分钟。各节点在12:00至13:55期间的负载在50 kW和150 kW之间随机生成。12:00的数据用于评估单时间断面场景下可调节分布式资源可传输调节能力,12:00至13:55(8个时间点)的数据用于评估多时间断面场景下可调节分布式资源可传输调节能力。假设每个储能系统的初始SOC为0.5,充电和放电效率均为0.95。目标函数中的惩罚项系数k设定为10。

[0184] 使用12:00时的负荷和光伏数据作为各节点的功率注入,评估单时间断面场景下可调节分布式资源可传输调节能力,单时间断面场景下可传输调节能力的上限和下限如表3所示,其对应的节点电压和线路视在功率如图3所示。

[0185] 表3 单时间断面场景下可调节分布式资源可传输调节能力的上限和下限

	可传输调节能力上限/ kW	可传输调节能力下限/ kW
[0186]	512.17	-492.91

[0187] 使用12:00至13:55期间的负荷和光伏数据作为各节点的功率注入,评估多时间断面场景下可调节分布式资源可传输调节能力,多时间断面场景下可传输调节能力的上限和下限如表4所示,其对应的节点电压和线路视在功率如图4所示。

[0188] 表4 多时间断面场景下可调节分布式资源可传输调节能力的上限和下限

	可传输调节能力上限/ kW	可传输调节能力下限/ kW
[0189]	315.79	-284.99

[0190] 可以理解的,本发明通过在不同时间尺度下,包括单时间断面以及多时间断面场景,分别对分布式资源可传输调节能力进行评估,提高了分布式资源调节能力评估的准确性,揭示了其在网络约束条件下传输的影响机理,为台区配电网安全、经济运行提供了有力的技术支撑。

[0191] 与现有技术相比,本发明提供的考虑台区配电网网络约束的分布式资源可传输调节能力评估方法的有益效果如下:

[0192] 1、本发明通过台区配电网潮流方程、实际线路容量、节点电压约束建立台区配电网网络约束条件,使在此基础上建立的分布式资源可传输调节能力优化评估模型综合考虑了台区配电网实际运行时面临的网络约束条件,从而提高了分布式资源调节能力评估的准确性。

[0193] 2、本发明通过功率、容量、荷电状态、充放电状态建立可调节分布式资源的运行约束条件,使在此基础上建立的分布式资源可传输调节能力优化评估模型符合分布式资源运行特性,从而提高了分布式资源调节能力评估的准确性。

[0194] 3、本发明通过在不同时间尺度下,包括单时间断面以及多时间断面场景,单时间断面场景用于提供快速的功率支撑,多时间断面场景用于提供一段持续时间内的削峰、填谷服务,分别对分布式资源可传输调节能力进行评估,提高了分布式资源调节能力评估的准确性,揭示了其在网络约束条件下传输的影响机理,为台区配电网安全、经济运行提供了有力的技术支撑。

[0195] 本领域技术人员可以理解,实现上述实施例方法的全部或部分流程,可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,所述的程序可存储于计算机可读存储介质中。其中,所述计算机可读存储介质为磁盘、光盘、只读存储记忆体或随机存储记忆体等。

[0196] 以上所述,仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。

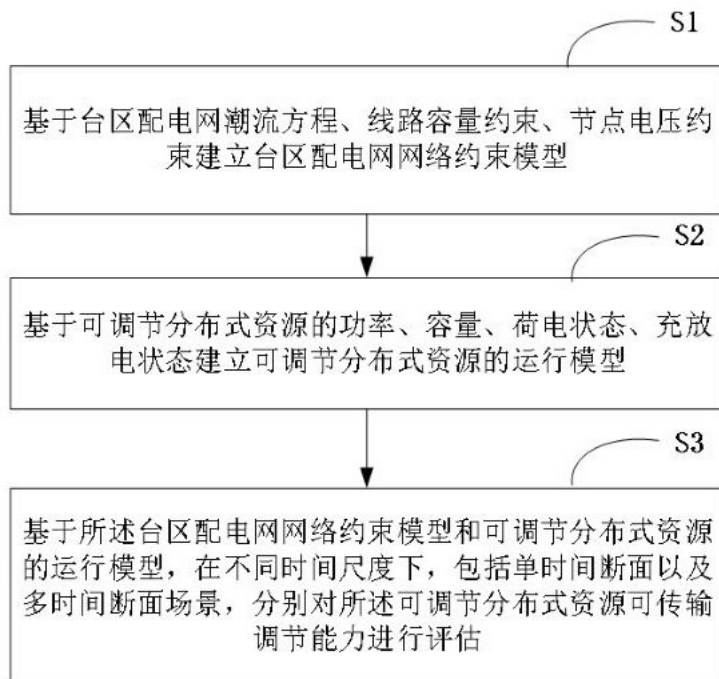


图 1

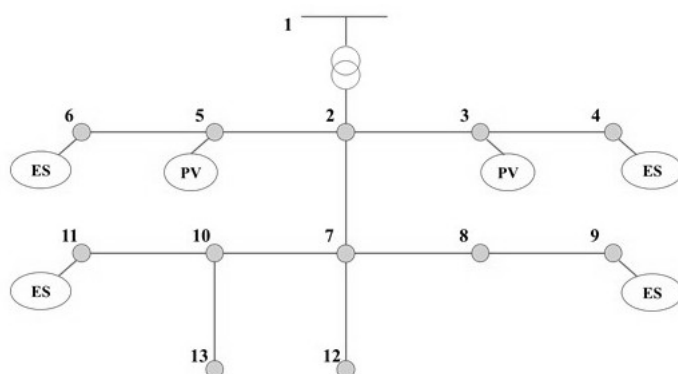


图 2

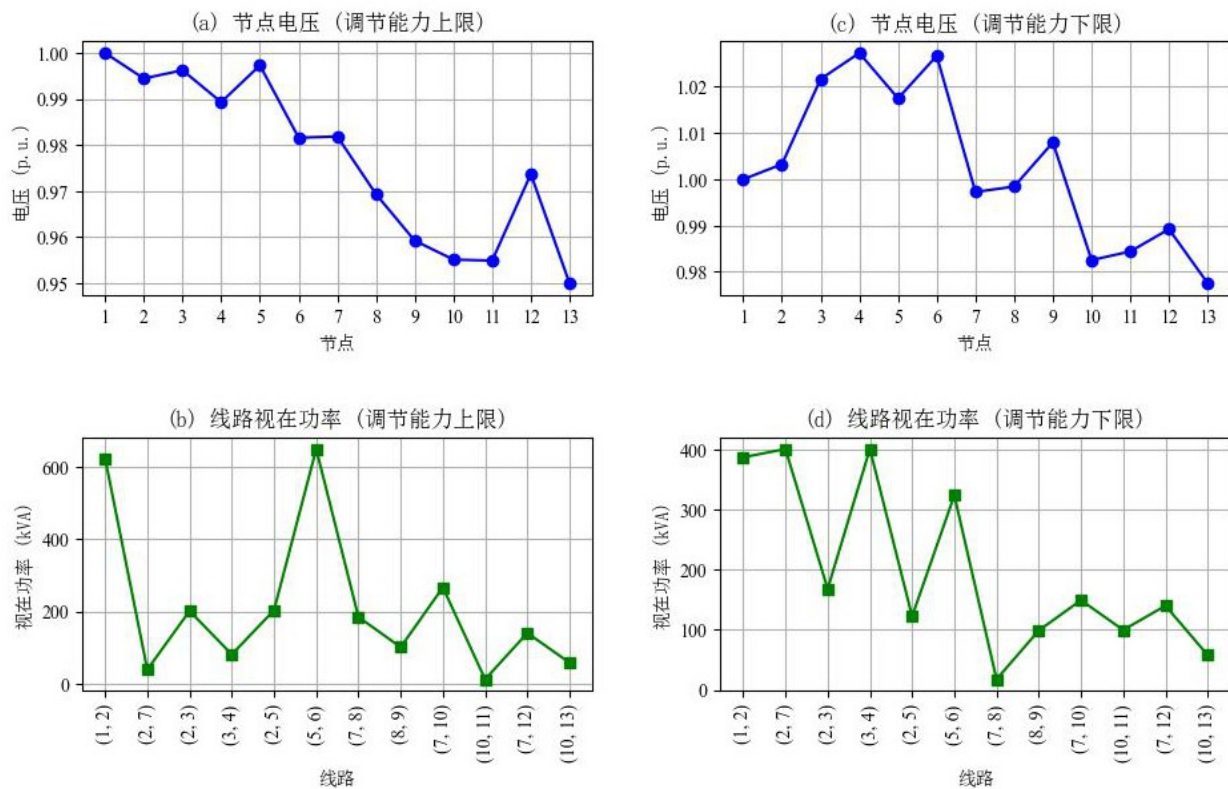


图 3

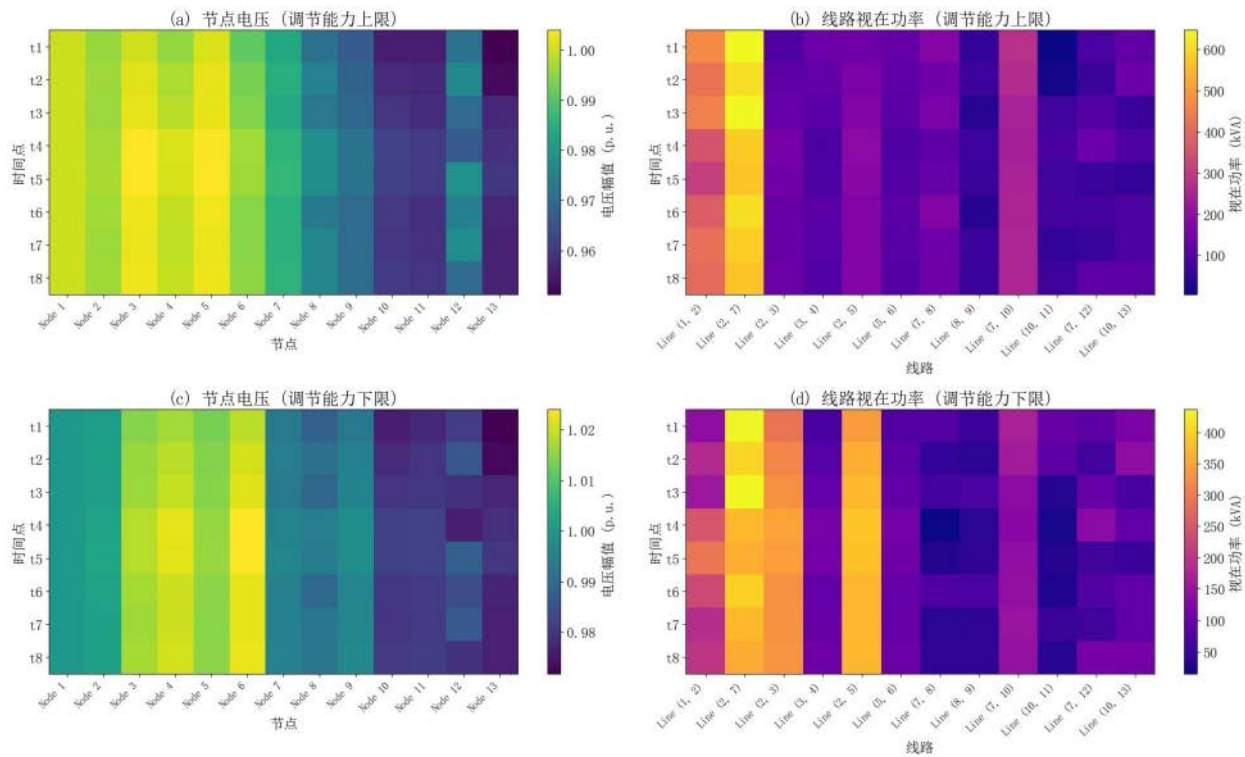


图 4