# 基于时序特性的微电网安全运行域模型及影响机理分析

郑舜玮,廖凯,杨健维,赵倩林,何正友 (西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要:为确定不同时序下接入配电系统的微电网安全运行范围,并对不同微电网之间的运行交互影响进行分析,以含微电网的配电系统为研究对象,提出基于时序特性的微电网安全运行域(TSC-MGSOR)模型及其影响机理分析方法。对微电网外特性进行建模,以描述不同时刻下微电网的发用电状态;在充分考虑可再生能源发电时序特性对微电网外特性影响的基础上,提出TSC-MGSOR的概念及模型,并给出模型的求解算法;基于所提TSC-MGSOR模型,分析微电网的接入对一维/二维TSC-MGSOR的影响机理。基于改进的IEEE 33节点系统进行仿真验证,结果表明,所提TSC-MGSOR模型能精确描述不同时刻微电网的安全运行范围,所提一维/二维TSC-MGSOR影响机理分析方法能有效分析微电网不同接入模式对一维/二维TSC-MGSOR的影响。

 关键词:分布式电源;配电网;微电网;时序特性;安全运行域;影响机理

 中图分类号:TM 71

 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202207016

#### 0 引言

为应对日益严峻的全球气候变化、环境污染、化 石能源短缺等问题,推动能源系统低碳化、清洁化和 可持续化转型成为世界各国的共识<sup>[1-3]</sup>。在此背景 下,我国提出"30·60"的宏伟目标:2030年前实现碳 达峰,2060年前实现碳中和。随着"30·60"目标的 持续推进,根据十四五规划和二〇三五年远景目标 对能源电力绿色化和低碳化的明确要求<sup>[4]</sup>,可以预 见,构建以新能源为主体的新型电力系统将成为未 来电力系统发展的主要趋势,并且分布式可再生能 源(renewable energy source, RES)将成为未来能源 电力消费的增量主体<sup>[5]</sup>。

目前,RES主要通过2种形式接入电力系统:以 大规模集中式的形式接入中高压电网,以小容量分 布式电源(distributed generation,DG)的形式接入中 低压配电网<sup>[6-7]</sup>。其中,RES以DG形式接入电力系 统因具有前期投资小、安装灵活、利于就地消纳等 优势,逐渐在中低压配电网中得到广泛应用<sup>[8-10]</sup>,这 种接入形式使传统配电网的单向潮流变为双向潮 流,导致出现系统电能质量恶化、难以控制等难题。 为解决以上问题,具有主动控制能力的微电网 (microgrid,MG)技术得以快速发展<sup>[11]</sup>。MG可将DG、 负荷、储能、控制装置等结合,形成单一可控的电力 系统单元,具有波动性、间歇性的RES通过MG的灵 活调节可变成友好的、确保用电可靠的稳定电源<sup>[12]</sup>,

收稿日期:2022-01-19;修回日期:2022-04-26 在线出版日期:2022-07-21 基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1766208)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1766208)

因此,分布式 RES 以 MG 模式接入配电网将是未来 配电系统演化的主要趋势<sup>[13-14]</sup>。然而, RES 出力随 时间变化呈现出时序特性, 且具有强随机性、波动性 和间歇性, RES 以 MG 模式接入配电网将给系统的 安全可靠运行带来挑战。

为评估含MG的配电系统可靠性,文献[15-17] 分析MG非计划解列运行、各种功率控制模式、孤岛 运行方式等不同接入模式对配电网可靠性的影响, 但均未能考虑MG中RES出力的间歇性对系统可靠性 的影响,文献[18]基于马尔可夫方法提出一种计及 MG中RES出力间歇性的配电网可靠性评估方法。 此外,随着储能技术的快速发展和我国电力市场改 革的逐步深入,已有研究提出基于储能多状态的模 型<sup>[19]</sup>和考虑MG市场交易影响<sup>[20]</sup>的配电系统可靠性 评估方案。尽管上述研究能有效评估不同MG接入 模式下配电系统的可靠性,但大多是从配电网的角度 对DG/MG接入后的配电网运行可靠性进行评估, 而较少从DG/MG的角度对配电系统中DG/MG的 运行能力进行评估。

近年来,为研究配电系统中DG/MG的运行能力:文献[21]提出一种计及N-1安全的DG出力控制可视化方法,但只能求解出DG机组组合出力上限,而不能得到完整的DG运行范围;文献[22]提出计及电压约束、网损等潮流条件的运行域概念以描述 DG/MG的出力范围,但未能考虑RES发电时序特性的影响,而RES发电时序特性直接影响不同时刻下DG/MG的实际调节能力,关系到DG/MG运行域求解结果的精确性和真实性;文献[23]在考虑源-荷不确定性的基础上,提出电力系统灵活性运行域 模型,分析电力系统应对电源侧和负荷侧波动的能 力,但未能考虑储能装置的影响。上述研究由于未 考虑RES发电时序特性和储能装置的影响,因此难 以适用于以新能源为主体的MG系统。此外,上述 研究均未考虑配电系统中MG之间的运行交互影 响,不能有效指导不同MG之间的协调运行。

基于上述分析,为解决RES发电时序特性导致MG运行范围难以精确刻画的难题以及明晰不同MG之间的运行交互影响机理,本文充分考虑RES发电时序特性,提出基于时序特性的微电网安全运行域(time sequence characteristic-based microgrid safety operation region,TSC-MGSOR)的概念及模型,分析MG接入对一维/二维TSC-MGSOR的影响机理,研究MG接入类型、接入位置、支路阻抗等对TSC-MGSOR的影响机制,并通过改进的IEEE 33节点系统仿真验证本文所提TSC-MGSOR模型的有效性以及影响机理分析方法的正确性。

#### 1 系统典型架构及建模

#### 1.1 系统典型架构

本文所研究的含 MG 的配电系统中接入了多 个 MG。MG 主要由风机(wind turbine, WT)、光伏 (photovoltaic, PV)、储能系统(battery storage system, BSS)、负荷(load, LD)等元件组成。MG 在自身发电 冗余时为配电系统提供能量,在自身供电不足时从 配电系统获取能量。含 MG 的配电系统典型架构如 附录 A 图 A1 所示。

#### 1.2 分布式能量单元建模

1.2.1 风力发电系统模型

$$p_{\text{wt,}i}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v(t) < v_{\text{in}}, v(t) > v_{\text{out}} \\ \frac{v(t) - v_{\text{in}}}{v_{\text{rate}} - v_{\text{in}}} P_{\text{WT,}i} & v_{\text{in}} \leq v(t) \leq v_{\text{rate}} \\ P_{\text{wT,}i} & v_{\text{rate}} < v(t) \leq v_{\text{out}} \end{cases}$$
(1)

式中: $p_{wt,i}(t)$ 为t时刻MG<sub>i</sub>中风机的输出功率;v(t)为 t时刻的风速; $v_{in}$ 、 $v_{rate}$ 、 $v_{out}$ 分别为风机的切入风速、额 定风速、切出风速; $P_{WT,i}$ 为MG<sub>i</sub>中风机的装机容量。 1.2.2 光伏发电系统模型

光伏输出功率主要取决于辐照强度和运行温 度,其出力数学模型为:

$$p_{\rm pv,i}(t) = \eta_{\rm pv,i} P_{\rm PV,i} \frac{G_i(t)}{G_{\rm stc}} \Big[ 1 + k_{\rm pv} \big( T_{\rm c,i}(t) - T_{\rm c, stc} \big) \Big]$$
(2)

式中: $p_{\text{pv},i}(t)$ 为t时刻 MG<sub>i</sub>中光伏输出功率; $\eta_{\text{pv},i}$ 为 MG<sub>i</sub>中光伏电池的发电效率; $P_{\text{pv},i}$ 为 MG<sub>i</sub>中光伏的装 机容量; $G_i(t)$ 为t时刻 MG<sub>i</sub>中的辐照强度; $G_{\text{ste}}$ 为标准 测试下的光照强度,取为1 kW / m<sup>2</sup>; $k_{\text{pv}}$ 为功率温度 系数,取为-0.35% / °C; $T_{\text{e},i}(t)$ 为t时刻 MG<sub>i</sub>中光伏电 池的表面温度; $T_{\text{e},\text{ste}}$ 为参考温度,取为25 °C。

1.2.3 储能系统模型

t时刻储能系统的荷电状态(state of charge, SOC)与t-1时刻的SOC和充放电功率有关,即:

$$S_{\text{oc},i}(t) = \begin{cases} S_{\text{oc},i}(t-1) + \frac{\eta_{\text{ch},i} p_{\text{ch},i}(t-1)\Delta t}{E_{\text{BSS},i}} & \hat{\mathcal{R}} \\ S_{\text{oc},i}(t-1) - \frac{p_{\text{dis},i}(t-1)\Delta t}{\eta_{\text{dis},i} E_{\text{BSS},i}} & \hat{\mathcal{M}} \end{cases}$$
(3)

式中: $S_{\text{oc},i}(t)$ 为t时刻 MG<sub>i</sub>中储能系统的 SOC; $\eta_{eh,i}$ 、  $\eta_{dis,i}$ 分别为 MG<sub>i</sub>中储能系统的充电效率和放电效 率; $p_{eh,i}(t)$ 、 $p_{dis,i}(t)$ 分别为t时刻 MG<sub>i</sub>中储能系统的充 电功率和放电功率; $E_{\text{BSS},i}$ 为 MG<sub>i</sub>中储能系统的额定 容量; $\Delta t$ 为时间间隔。

为了避免过充过放对储能系统的不利影响, SOC需满足以下条件:

$$S_{\text{OC},i}^{\min} \leqslant S_{\text{OC},i}(t) \leqslant S_{\text{OC},i}^{\max} \quad \forall t, i$$
(4)

式中: $S_{\text{OC},i}^{\text{max}}$ 、 $S_{\text{OC},i}^{\text{min}}$ 分别为 $MG_i$ 中储能系统 SOC 的上、 下限。

此外,储能系统的充放电功率应在其额定充放 电功率范围之内,即:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{ch,i}(t) \leq P_{BSS,i} \\ -P_{BSS,i} \leq p_{dis,i}(t) \leq 0 \end{cases} \quad \forall t, i$$
(5)

式中: $P_{\text{BSS},i}$ 为MG<sub>i</sub>中储能系统的额定功率。

#### 1.3 MG外特性建模

MG外特性是指MG作为一个整体接入配电网的发用电特性,MG接入配电网的发用电特性,MG接入配电网的制约条件仅针对MG与配电网之间的公共连接点,而不需要细化至MG中各DG。为有效表征MG发用电外特性,本文分别定义MG额定输出功率(rated output power,ROP)、额定输入功率(rated input power,RIP)、最大输出功率(maximum output power,MOP)、最大输入功率(maximum input power,MIP)指标进行MG外特性建模。

1)MG额定输出功率。

MG 额定输出功率是指 MG 向配电网外送的功 率额定值,即 MG 内部各分布式能量单元的装机容 量之和,如式(6)所示。

$$R_{\text{OP},i} = \sum_{k \in S_i} P_{k,i} \tag{6}$$

式中: $R_{\text{OP},i}$ 为MG<sub>i</sub>的额定输出功率; $P_{k,i}$ 为MG<sub>i</sub>中能量 单元k的装机容量; $S_i$ 为MG<sub>i</sub>内部风机、光伏和储能 系统组成的能量单元集合,即 $S_i \subseteq \{\text{PV}, \text{WT}, \text{BSS}\}$ 。

2)MG额定输入功率。

MG 额定输入功率是指 MG 从配电网吸收的功率额定值,如式(7)所示。

$$R_{\mathrm{IP},i} = -\left(P_{\mathrm{BSS},i} + \max\left\{L_i\right\}\right) \tag{7}$$

式中: $R_{IP,i}$ 为 MG<sub>i</sub>的额定输入功率; $L_i = \{p_{ID,i}(t)\}, p_{ID,i}(t)$ 为t时刻 MG<sub>i</sub>的负荷需求。

3)MG最大输出功率。

MG最大输出功率是指不同时刻MG在满足本 地负荷需求的前提条件下能够向配电网提供支撑功 率的最大值,即:

$$M_{\text{OP},i}(t) = \max\left\{\sum_{k \in \varphi_i} p_{k,i}(t) + p_{\text{dis},i}^{\max}(t) - p_{\text{LD},i}(t), 0\right\} \quad (8)$$

$$p_{\text{dis},i}^{\max}(t) = \min\left\{P_{\text{BSS},i}, \frac{\eta_{\text{dis},i} \left(S_{\text{OC},i}(t) - S_{\text{OC},i}^{\min}\right) E_{\text{BSS},i}}{\Delta t}\right\}$$
(9)

式中: $M_{\text{OP},i}(t)$ 为t时刻 MG<sub>i</sub>的最大输出功率; $\varphi_i$ 为 MG<sub>i</sub>中 RES 机组单元集合,即 $\varphi_i \subseteq \{\text{WT}, \text{PV}\}; p_{k,i}(t)$ 为t时刻 MG<sub>i</sub>中分布式 RES 机组k的最大输出功率;  $p_{\text{dis},i}^{\text{max}}(t)$ 为t时刻 MG<sub>i</sub>中储能系统的最大放电功率。

4)MG最大输入功率。

MG最大输入功率是指不同时刻MG能够接纳 配电网输入功率的最大值,即:

$$M_{\rm IP,i}(t) = -\left(p_{\rm LD,i}(t) + p_{\rm ch,i}^{\rm max}(t)\right)$$
(10)

$$p_{\mathrm{ch},i}^{\max}(t) = \min\left\{P_{\mathrm{BSS},i}, \frac{\left(S_{\mathrm{OC},i}^{\max} - S_{\mathrm{OC},i}(t)\right)E_{\mathrm{BSS},i}}{\eta_{\mathrm{ch},i}\Delta t}\right\} (11)$$

式中: $M_{IP,i}(t)$ 、 $p_{ch,i}^{max}(t)$ 分别为t时刻 MG<sub>i</sub>的最大输入 功率和MG<sub>i</sub>中储能系统的最大充电功率。

上述指标可有效表征 RES 发电时序特性对 MG 不同时刻发用电状态的影响,进而刻画出考虑 RES 发电时序特性的 MG 外特性模型,为 TSC-MGSOR 模 型的研究奠定基础。

#### 2 TSC-MGSOR 模型

#### 2.1 TSC-MGSOR 概念

本文提出TSC-MGSOR的概念,用以综合考虑 RES发电时序特性、MG内部负荷需求、配电网潮流 约束等对MG运行的影响,探究N-0运行情况下MG 的最大运行调节范围。

2.1.1 计及时序特性的MG工作点的定义

计及时序特性的 MG 工作点 (time sequence characteristic-based microgrid operation point, TSC-MGOP)是指不同时刻 MG 面向配电系统的输出 / 输入功率、节点电压、运行方式数据。将 t 时刻 MG<sub>i</sub>的 TSC-MGOP 描述为:

 $O_{P,i}(t) = [P_{MG,i}(t), Q_{MG,i}(t), V_{MG,i}(t), \omega_{MG,i}(t)]$  (12) 式中: $P_{MG,i}(t), Q_{MG,i}(t), V_{MG,i}(t), \omega_{MG,i}(t)$ 分别为t时刻 MG<sub>i</sub>接入配电网的有功功率、无功功率、并网点电压 和运行方式。MG接入配电网的运行方式<sup>[24]</sup>主要包 括:有功功率P恒定、节点电压U恒定的PV运行方 式,有功功率P恒定、电流幅值I恒定的PI运行方 式,有功功率P恒定、节点电压U不定、无功功率Q 受P和U限定的P-Q(V)运行方式。

#### 2.1.2 TSC-MGSOR 定义

TSC-MGSOR 是指在不同时刻 MG 接入配电系统的运行过程中满足安全运行约束条件的 TSC-MGOP 集合。若工作点在运行域内,即能满足系统安全运行约束条件,则称其为运行安全或 N-0安全的工作点,否则称其为不安全的工作点。安全工作点和不安全工作点间的界限,称为安全运行域边界。安全运行域边界上的工作点称为临界工作点。一维TSC-MGSOR 是指在一维空间上由单个 MG 的安全工作点构成的集合,二维 TSC-MGSOR 是指在二维空间上由所观测的 2个 MG 的安全工作点构成的集合,高维 TSC-MGSOR 是指在二维空间上由所观测的 2个 MG 的安全工作点构成的集合,可以此类推至高维 TSC-MGSOR。不同于传统 MG运行域<sup>[22]</sup>和配电网安全域<sup>[25]</sup>的概念,本文所提 TSC-MGSOR 具有随时间变化的时序特性,能更精确、真实地描述不同时刻 MG 的安全运行调节范围。

#### 2.2 TSC-MGSOR 建模

本文重点关注不同时刻的MG安全出力范围,以 MG与配电网的交互功率为变量,建立TSC-MGSOR 模型,如式(13)所示。

$$\Omega(t) = \left\{ \left( P_{\mathrm{MG},i}(t), Q_{\mathrm{MG},i}(t) \right) \middle| \mathbf{W} \left( \mathbf{O}_{\mathrm{P},i}(t) \right) \leq 0 \right\} (13)$$

式中: $\Omega(t)$ 为t时刻MG安全运行域; $W(O_{P,i}(t)) \leq 0$ 表示t时刻MG,满足系统N-0安全运行条件。

TSC-MGSOR模型具体约束条件如下。

1)RES发电时序特性约束。

t时刻的MG出力受制于RES发电时序特性约束,即:

$$M_{\mathrm{IP},i}(t) \leq P_{\mathrm{MG},i}(t) \leq M_{\mathrm{OP},i}(t) \quad \forall t, i$$
(14)

$$Q_{\min,i}(t) \leq Q_{\mathrm{MG},i}(t) \leq Q_{\max,i}(t) \quad \forall t, i$$
(15)

式中: $Q_{\max,i}(t)$ 、 $Q_{\min,i}(t)$ 分别为t时刻 MG<sub>i</sub>的无功出力上、下限。

2)系统电压约束,即:

 $U_{\min} I_M \leq U(t) \leq U_{\max} I_M \quad \forall t \tag{16}$ 

式中: $U(t) = [U_1(t), \dots, U_m(t), \dots, U_M(t)]^T$ 为 t 时刻 配电系统的节点电压向量, $U_m(t)(m=1, 2, \dots, M)$ 为 t 时刻配电系统中节点 m 的电压幅值, M 为配电系统 节点总数; $U_{max}, U_{min}$ 分别为系统节点电压允许的上、 下限; $I_M$ 为 M×1 阶单位列向量。

3)系统潮流约束,即:

$$\begin{cases} P_i(t) = U_i(t) \sum_{j \in \phi_i} \left[ U_j(t) \left( G_{ij} \cos \theta_{ij}(t) + B_{ij} \sin \theta_{ij}(t) \right) \right] \\ Q_i(t) = U_i(t) \sum_{j \in \phi_i} \left[ U_j(t) \left( G_{ij} \cos \theta_{ij}(t) - B_{ij} \sin \theta_{ij}(t) \right) \right] \end{cases}$$

 $\forall t; i \in \psi; \phi_i \subseteq \psi \quad (17)$ 

式中: $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$ 分别为t时刻节点i的有功和无功 功率; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点i和节点j之间导纳的实部 和虚部; $\theta_{ij}(t)$ 为t时刻节点i和节点j之间的电压相 位差; $\phi_i$ 为与节点i相连的节点集合; $\psi$ ={1,2,...,M} 为系统节点集合。

4)潮流方向约束。

为防止配电系统逆流向大电网供电,需设置潮 流方向约束<sup>[22]</sup>,以从大电网流入配电系统为正方向, 约束为:

$$S_{\rm L1}(t) \ge 0 \quad \forall t \tag{18}$$

式中:S<sub>L1</sub>(t)为t时刻的馈线出口潮流,其值大于0表示潮流方向为正。

5)馈线容量约束,即:

$$\mathbf{S}_{\mathrm{L}}(t) \leq S_{\mathrm{max}} \mathbf{I}_{H} \quad \forall t \tag{19}$$

式中: $S_{L}=[S_{L1}, \dots, S_{Lh}, \dots, S_{LH}]^{T}$ , $S_{Lh}(h=1, 2, \dots, H)$ 为 支路h的馈线容量,H为配电系统中支路总数; $S_{max}$ 为 线路额定容量; $I_{H}$ 为 $H \times 1$ 阶单位列向量。

TSC-MGSOR模型的求解流程图如附录A图A2 所示。

2.3 TSC-MGSOR 的应用

1)TSC-MGSOR 主要适用于接入辐射状配电网的 MG,其具有时序特性,可得到不同时刻 MG 的安 全运行调节范围,该范围可作为不同时序下 MG 接 入配电网的控制调节依据,为系统调度运行提供一 定的理论指导。

2)多维TSC-MGSOR能够观测不同MG共同作 用下的安全运行区间,能够为确定多个MG协调运 行的调节范围提供理论依据。

3)通过TSC-MGSOR可得到接入配电系统不同 节点MG的运行范围,该范围可作为RES以MG模式 接入配电网的选址定容依据,为含MG的配电系统 协同规划提供相关理论指导。

#### 3 TSC-MGSOR 影响机理分析

本节首先对配电网中MG接入后节点电压之间 的交互影响进行分析,以明确电压约束边界的变化 机理,在此基础上,分析MG的接入对一维/二维 TSC-MGSOR的影响机理。由于MG接入的节点可 转化为PV和PQ这2类节点进行分析计算<sup>[22]</sup>,因此 本文主要对PV型和PQ型TSC-MGSOR的影响机理 进行研究。

#### 3.1 配电网中MG接入后的电压交互影响

选定 MG<sub>i</sub>为研究对象,为分析 MG<sub>j</sub>的接入与 MG<sub>i</sub> 并网点电压间的交互影响,根据 MG<sub>j</sub>接入位置的不 同,分为以下 5种场景进行讨论:Case 1, MG<sub>j</sub>处于 MG<sub>i</sub>所在支路节点后方;Case 2, MG<sub>j</sub>处于 MG<sub>i</sub>所在 支路节点前方;Case 3, MG<sub>j</sub>与 MG<sub>i</sub>分别处于不同支 路;Case 4, MG<sub>i</sub>处于主路, MG<sub>j</sub>处于支路;Case 5, MG<sub>i</sub>处于主路, MG<sub>i</sub>处于支路。

Case 1—Case 3的等效拓扑如附录 B图 B1 所示。在Case 1下, MG<sub>i</sub>接入前 / 后 MG<sub>i</sub>的电压 $U_i / U'_i$ 及电压变化值 $\delta U_i$ 分别为:

$$U_{i} = U_{0} - \sum_{k=1}^{i} \sum_{n=k}^{M} \frac{1}{U_{k}} \Big[ \Big( P_{\text{LD},n} - P_{\text{MG},i} \Big) R_{k} + \Big( Q_{\text{LD},n} - Q_{\text{MG},i} \Big) X_{k} \Big]$$
(20)

$$U_{i}' = U_{0} - \sum_{k=1}^{i} \sum_{n=k}^{M} \frac{1}{U_{k}'} \Big[ \Big( P_{\text{LD},n} - P_{\text{MG},i} - P_{\text{MG},j} \Big) R_{k} + \Big] \Big] \\ \Big( Q_{\text{LD},n} - Q_{\text{MG},i} - Q_{\text{MG},j} \Big) X_{k} \Big]$$
(21)

$$\delta U_{i} = U_{i}' - U_{i} = \sum_{k=1}^{i} \frac{1}{U_{k}'} \Big[ \Big( P_{\text{MG},j} R_{k} + Q_{\text{MG},j} X_{k} \Big) + \delta U_{k} \Delta U_{k} \Big] (22)$$

式中: $U_0$ 为平衡节点电压; $U_k$ 为节点k的电压; $P_{LD,n}$ 、  $Q_{LD,n}$ 分别为节点n负荷的有功和无功功率; $R_k$ 、 $X_k$ 分 别为支路k的电阻和电抗; $P_{MG,i}$ 、 $Q_{MG,i}$ 分别为 $MG_i$ 向 配电系统输出的有功和无功功率; $\Delta U_k = U_{k-1} - U_k$ 。

同理, Case 2和 Case 3下  $MG_j$ 接入前后  $MG_i$ 的 电压变化值  $\delta U_i$ 分别如式(23)和式(24)所示。

$$\delta U_{i} = \sum_{k=1}^{j} \frac{1}{U_{k}'} \left( P_{\text{MG},j} R_{k} + Q_{\text{MG},j} X_{k} \right) + \sum_{k=1}^{i} \frac{\delta U_{k} \Delta U_{k}}{U_{k}'} \quad (23)$$
  
$$\delta U_{i} = \sum_{k=1}^{i} \frac{1}{U_{k}'} \left( P_{\text{MG},j} R_{k} + Q_{\text{MG},j} X_{k} \right) + \sum_{k=1}^{i} \frac{\delta U_{k} \Delta U_{k}}{U_{k}'} \quad (24)$$

式中:s为MG<sub>i</sub>和MG<sub>i</sub>所在支路的公共节点。

将 MG<sub>i</sub>和 MG<sub>i</sub>所在支路外的其余支路视作聚集 负荷, Case 4和 Case 5下 MG<sub>i</sub>接入前后 MG<sub>i</sub>的电压 变化值  $\delta U_i$ 可分别等效为 Case 1和 Case 2下的情况 进行计算。

3.2 MG 接入对一维 TSC-MGSOR 的影响机理分析
3.2.1 MG 接入对 PV 型一维 TSC-MGSOR 的影响机 理分析

PV型MG运行域主要由馈线容量约束边界构成<sup>[22]</sup>,因此,在MG<sub>i</sub>的安全运行范围内,MG<sub>j</sub>接入配电系统将主要通过改变MG<sub>i</sub>的馈线容量边界来使一维TSC-MGSOR发生变化。

1)MG<sub>i</sub>运行在正半轴,即P<sub>MG,i</sub>>0时,MG<sub>i</sub>向配电 系统提供能量支撑,这导致MG<sub>i</sub>的潮流方向约束上 限减小,即向负半轴方向移动。同时,MG<sub>i</sub>馈线容量 约束下限向负半轴方向移动。随着P<sub>MG,i</sub>增大,MG<sub>j</sub> 向系统传输的能量将限制MG<sub>i</sub>的输出上限,导致 MG<sub>i</sub>馈线容量约束上边界向负半轴方向移动。因此, MG<sub>i</sub>运行在正半轴时,PV型MG<sub>i</sub>的一维TSC-MGSOR 向负半轴方向移动。

2)MG<sub>i</sub>运行在负半轴,即P<sub>MG,i</sub><0时,MG<sub>i</sub>从配电 系统吸收能量,这导致MG<sub>i</sub>潮流方向约束边界向正 半轴方向移动。同时,MG<sub>i</sub>馈线容量约束下边界向 正半轴方向移动,此时MG<sub>i</sub>可以促进MG<sub>i</sub>向系统提 供更多的能量,增大了MG<sub>i</sub>馈线容量约束上边界。 因此,MG<sub>i</sub>运行在负半轴时,PV型MG<sub>i</sub>的一维TSC-MGSOR向正半轴方向移动。

3.2.2 MG 接入对 PQ 型一维 TSC-MGSOR 的影响机 理分析

对于3.1节中的5种场景, MG; 接入配电网导致

MG<sub>i</sub>的电压变化情况可以统一描述为:

$$\delta U_{i} = \frac{1}{U_{k}'} \sum_{k=1}^{y} \left( P_{\text{MG},j} R_{k} + Q_{\text{MG},j} X_{k} \right) + \sum_{k=1}^{i} \frac{\delta U_{k} \Delta U_{k}}{U_{k}'} \quad (25)$$

式中: $y \in \{i, j, s\}$ ,在场景 Case 1—Case 5下y的取值 分别为i, j, s, i, j。

令 $\delta U_k / \delta U_i = \gamma_k$ ,则式(25)可转化为:

$$\delta U_i \left( 1 - \sum_{k=1}^i \frac{\gamma_k \Delta U_k}{U'_k} \right) = \frac{1}{U'_k} \sum_{k=1}^y \left( P_{\text{MG},j} R_k + Q_{\text{MG},j} X_k \right)$$
(26)

当系统正常运行时,有 $\Delta U_k \ll U'_k$ ,且由式(25)可 知, $\delta U_k \leqslant \delta U_i$ ,因此有:

$$0 < 1 - \sum_{k=1}^{i} \frac{\gamma_k \Delta U_k}{U'_k} \le 1$$
(27)

可得:

$$\begin{cases} \delta U_{i} = \xi_{i} \frac{1}{U_{k}'} \sum_{k=1}^{y} \left( P_{\text{MG},j} R_{k} + Q_{\text{MG},j} X_{k} \right) = R P_{\text{MG},j} + X Q_{\text{MG},j} \\ \xi_{i} = 1 / \left( 1 - \sum_{k=1}^{i} \frac{\gamma_{k} \Delta U_{k}}{U_{k}'} \right) \\ R = \frac{\xi_{i}}{U_{k}'} \sum_{k=1}^{y} R_{k}, \quad X = \frac{\xi_{i}}{U_{k}'} \sum_{k=1}^{y} X_{k} \end{cases}$$
(28)

需说明的是,当不考虑线路损耗时, $\Delta U_k=0$ ( $k \in \psi$ ),此时可将式(28)简化为式(29)进行计算 分析。

$$\begin{cases} \delta U_{i} = \frac{1}{U_{k}'} \sum_{k=1}^{y} \left( P_{\text{MG},j} R_{k} + Q_{\text{MG},j} X_{k} \right) = R P_{\text{MG},j} + X Q_{\text{MG},j} \\ R = \frac{1}{U_{k}'} \sum_{k=1}^{y} R_{k}, \quad X = \frac{1}{U_{k}'} \sum_{k=1}^{y} X_{k} \end{cases}$$
(29)

PQ型MG运行域主要由电压约束边界构成<sup>[22]</sup>, 根据式(28)将MG运行范围划分为如图1所示的4 个区域。图中:直线L1的斜率为-*R/X*,参数*R*和*X* 可由式(28)计算得出;*P*<sub>min</sub>、*P*<sub>max</sub>、*Q*<sub>min</sub>、*Q*<sub>max</sub>分别为微 网的有功出力最小值、有功出力最大值、无功出力最 小值和无功出力最大值。





1)当 $MG_i$ 运行在区域 I 时,由式(28)可知, $MG_i$ 接入后 $MG_i$ 的电压变化值 $\delta U_i > 0$ 。由式(20)可知, 当 $MG_i$ 出力增大时, $U_i$ 随之增大。因此, $MG_i$ 运行在 区域 I 导致 $MG_i$ 在电压约束边界向负半轴方向移 动。同时,由 3.2.1节可知, $P_{MG,i}>0$ 导致  $MG_i$ 潮流方向约束边界和馈线容量边界向负半轴方向移动。因此, $MG_i$ 运行在区域 I 导致  $PQ 型 MG_i$ 的一维 TSC-MGSOR 向负半轴方向移动。

2)当MG<sub>i</sub>运行在区域 II 时,δU<sub>i</sub>>0,这导致 MG<sub>i</sub> 在电压约束边界向负半轴方向移动。同时,由3.2.1 节可知,P<sub>MG,j</sub><0导致 MG<sub>i</sub>潮流方向约束边界和馈线 容量约束向正半轴方向移动。因此,MG<sub>j</sub>运行在区 域 II 导致 PQ型 MG<sub>i</sub>的一维 TSC-MGSOR 向负半轴方 向移动。

3)当MG<sub>i</sub>运行在区域Ⅲ时,δU<sub>i</sub><0,这导致MG<sub>i</sub> 的电压约束下限和上限向正半轴方向移动。此时 P<sub>MG,j</sub><0,这导致MG<sub>i</sub>潮流方向约束边界和馈线容量 约束向正半轴方向移动。因此,MG<sub>j</sub>运行在区域Ⅲ 导致PQ型MG<sub>i</sub>的一维TSC-MGSOR向正半轴方向 移动。

4)当MG<sub>i</sub>运行在区域IV时,δU<sub>i</sub><0,这导致MG<sub>i</sub> 的电压约束边界向正半轴方向移动。此时P<sub>MG,j</sub>>0, 这导致MG<sub>i</sub>潮流方向约束边界和馈线容量约束向负 半轴方向移动。因此,MG<sub>i</sub>运行在区域IV导致PQ型 MG<sub>i</sub>的一维TSC-MGSOR向正半轴方向移动。

#### 3.3 MG 接入对二维 TSC-MGSOR 的影响机理分析

将3.2节中关于MG接入对一维TSC-MGSOR的 影响机理分析推广至MG接入对二维TSC-MGSOR 的影响机理分析。

1) 对于 PV 型二维 TSC-MGSOR: 当  $MG_{j}$ 运行在 正半轴, 即  $P_{MG,j} > 0$  时, PV 型二维 TSC-MGSOR 向第 三象限方向移动; 当  $MG_{j}$ 运行在负半轴, 即  $P_{MG,j} < 0$ 时, PV 型二维 TSC-MGSOR 向第一象限方向移动。

2)对于PQ型二维TSC-MGSOR:当MG;运行在区 域 I 时,PQ型二维TSC-MGSOR向第三象限方向移 动;当MG;运行在区域 II 时,PQ型二维TSC-MGSOR 向第三象限方向移动,随着MG;吸收有功功率的增 加,馈线容量约束下边界向第一象限方向移动,导致 运行域缩小;当MG;运行在区域 III 时,PQ型二维 TSC-MGSOR向第一象限方向移动;当MG;运行在区 域 IV 时,PQ型二维TSC-MGSOR向第一象限方向移 动,随着MG;发出有功功率的增加,潮流方向约束边 界和馈线容量约束上边界向第三象限方向移动,导 致运行域缩小。

需要说明的是,上述机理分析方法可以推广至 MG 接入对于高维 PQ / PV 型 TSC-MGSOR 的影响机 理分析,本文不再赘述。

#### 4 仿真分析

基于 MATLAB 仿真平台,以改进的 IEEE 33 节 点系统为例进行仿真分析,验证所提 TSC-MGSOR 模 型的有效性以及影响机理分析方法的正确性。光 照、温度、风速等数据选自我国西南地区某地实测数据,如附录C图C1所示。选取的典型日MG负荷和储能系统SOC数据如附录C图C2所示。

# 4.1 RES发电时序特性对 MG 安全运行域的影响 验证

在节点 16 处依次接入 PQ 型和 PV 型 MG,系 统结构如附录 D图 D1 所示,设定 PQ 型 MG 功率因 数为 0.90, PV 型 MG 电压为 1.00 p.u.。 MG<sub>16</sub>中风机 和光伏的额定功率分别为 3 000 kW 和 2 400 kW, 储能系统的额定功率和额定容量分别为 600 kW 和 3 000 kW ·h。

MG安全运行域仿真结果如附录D表D1所示, 图 2 为在 PQ / PV 型 MG 最大允许出力下系统馈线 出口潮流S<sub>11</sub>(标幺值)变化曲线。由图可知:PQ型和 PV型一维TSC-MGSOR呈现出随时间变化的时序特 性:PO型一维TSC-MGSOR在1-8h的运行域长度 呈减小趋势,这是因为风速在该时间段逐渐降低而 负荷需求逐渐增长,导致MG向配电网的供电能力 下降,进而造成系统馈线出口潮流增大;随着在9-20h风速和辐照强度的提升,MG供电能力逐渐增 强,一维TSC-MGSOR的运行域长度逐渐增大,系统 馈线出口潮流减小;而在21-24h,风速和辐照强 度逐渐降低,一维TSC-MGSOR的运行域长度逐渐减 小,系统馈线出口潮流再次增大。此外,通过对比分 析可得:PV型MG接入下的系统馈线出口潮流变化 趋势与PQ型MG接入下的相同;PV型和PQ型一维 TSC-MGSOR 的时序特性一致,且相较于PQ型一维 TSC-MGSOR, PV型一维TSC-MGSOR的区间范围更 大,调节能力更强,从而有利于保障系统稳定运行。





采用文献[22]中的方法仿真得到PQ型和PV 型MG<sub>16</sub>的运行域分别为[660,2050] kW和[-420, 5690] kW。分析可知,文献[22]中的方法未能考虑 RES发电时序特性,这导致模型中的MG出力范 围大于不同时刻的MG实际调节能力,而本文所提 TSC-MGSOR模型通过引入RES发电时序特性,能够 更加精确地描述不同时刻的MG运行范围。

#### 4.2 光伏和MG安全运行域对比仿真分析

在节点16处接入与4.1节MG中相同容量的光 伏发电系统,对比分析单一类型RES与MG安全运 行域的不同特征。由于光伏发电系统通常为最大功 率控制接入,因此本文将其等效为PQ型节点,与PQ 型TSC-MGSOR进行对比分析。

仿真结果如图 3 所示,图中 P<sub>MG16</sub>、P<sub>PV16</sub>分别为节 点 16处接入的 MG 和光伏有功出力。由图可知:光 伏安全运行域在 1—9、22—24 h 无解,这是因为在 1—7、23、24 h 辐照强度为0,导致光伏发电系统不 能为配电系统提供能量支撑;在 8—9、22 h 辐照强 度较低,这导致光伏系统发电功率无法达到安全运 行域约束要求的最小接入功率,从而不能接入配电 系统。对比不同时刻的光伏与 MG安全运行域可知, 光伏发电系统的全天运行调节能力明显不如 MG。 因此,相较于单一的光伏发电系统,MG能够发挥多 类型 RES 的互补性,具有更强的运行调节能力。



Fig.3 Comparison of time sequence characteristic-based MG and PV safety operation regions

#### 4.3 MG 接入对一维 TSC-MGSOR 影响的仿真验证

选取17h的运行数据,仿真验证在节点27接入的MG<sub>17</sub>对节点16处以PQ/PV方式接入的MG<sub>16</sub>的安全运行域的影响。系统结构如附录D图D2所示。将MG<sub>27</sub>运行范围进行划分,如附录D图D3所示。在区域 I—IV中选取如表1所示的观测点进行仿真,验证MG<sub>27</sub>接入对PQ型MG<sub>16</sub>一维TSC-MGSOR的影响,并选取如表2所示的观测点进行仿真,验证MG<sub>27</sub>接入对PV型MG<sub>16</sub>一维TSC-MGSOR的影响,表中观测点0表示MG<sub>27</sub>未接入配电系统。

#### 表1 PQ型观测点设置

166

Table 1 Setting of PQ-type observation points

位置	(有功 / MW, 无功 / Mvar)							
	观测点0	观测点1	观测点2	观测点3	观测点4			
区域I	(0,0)	(1.0,0)	(2.0,0)	(3.0,0)	(4.0,0)			
区域Ⅱ	(0,0)	(-0.5,1.0)	(-1.0,2.0)	(-1.5,3.0)	(-2.0,4.0)			
区域Ⅲ	(0,0)	(-0.5,0)	(-1.0,0)	(-1.5,0)	(-2.0,0)			
区域Ⅳ	(0,0)	(1.0,-2.0)	(2.0,-4.0)	(3.0,-6.0)	(4.0, -8.0)			

#### 表2 PV型观测点设置

Table 2 Setting of PV-type observation points

台里	(有功/MW,无功/Mvar)						
迎且	观测点0	观测点1	观测点2	观测点3	观测点4		
负半轴	(0,0)	(-0.5,0)	(-1.0,0)	(-1.5,0)	(-2.0,0)		
正半轴	(0,0)	(1.0, 0)	(2.0,0)	(3.0,0)	(4.0,0)		

PQ型和PV型MG<sub>16</sub>一维TSC-MGSOR在不同观测点下的各约束边界和TSC-MGSOR的仿真结果分别如图4和图5所示。

由图4可知:当MG<sub>27</sub>运行在区域 I 时, PQ 型 MG<sub>16</sub>一维TSC-MGSOR向负半轴方向移动,随着观测 点MG<sub>27</sub>输出功率的增大, MG<sub>16</sub>一维TSC-MGSOR电 压约束边界、潮流方向约束边界和馈线容量约束边 界均向负半轴方向移动;当MG<sub>27</sub>运行在区域 II 时, PQ型MG<sub>16</sub>一维TSC-MGSOR向负半轴方向移动, 而 移动幅度小于区域 I 的观测点, 这是因为区域 II 的 观测点导致的MG<sub>16</sub>节点电压变化小于区域 I 的观 测点;当MG<sub>27</sub>运行在区域 II 时, PQ 型 MG<sub>16</sub>一维TSC-











MCSOR向正半轴方向移动,此时,电压约束边界、 潮流方向约束边界和馈线容量边界均向正半轴方 向移动;当MG27运行在区域N时,PQ型MG16一维 TSC-MCSOR向正半轴方向移动,电压边界也向正半 轴方向移动,而潮流方向约束边界和馈线容量边界 向负半轴方向移动。仿真结果与3.2节的理论分析 一致,有效验证了本文所提PQ型一维TSC-MCSOR 影响机理分析方法的正确性。

由图 5 可知:当 MG<sub>27</sub>运行在负半轴时,PV 型 MG<sub>16</sub>一维 TSC-MGSOR 向正半轴方向移动;当 MG<sub>27</sub> 运行在正半轴时,PV 型 MG<sub>16</sub>一维 TSC-MGSOR 向负 半轴方向移动。仿真结果验证了 3.2 节所提 PV 型一 维 TSC-MGSOR 影响机理分析方法的正确性。

#### 4.4 MG 接入对二维 TSC-MGSOR 影响的仿真验证

选取节点16和节点25处MG构成的二维TSC-MGSOR为研究对象,分析在节点27接入MG对其产生的影响。系统结构如附录D图D4所示。采用17h的MG运行数据进行仿真验证,MG<sub>16</sub>的参数设置与4.1节中相同,MG<sub>25</sub>的参数设置如附录D表D2所示。 分别基于表1和表2的观测点分析MG<sub>27</sub>接入对PQ型和PV型二维TSC-MGSOR的影响。

MG<sub>27</sub>未接入时的二维TSC-MGSOR仿真结果如 附录E图E1所示。不同区域观测点下MG<sub>27</sub>接入对 PQ型二维TSC-MGSOR的影响如附录E图E2所示。 由仿真结果可知:当MG<sub>27</sub>运行在区域I时,PQ型二 维TSC-MGSOR向第三象限方向移动;当MG<sub>27</sub>运行 在区域II时,PQ型二维TSC-MGSOR向第三象限方 向移动,且随着MG<sub>27</sub>吸收功率的增加,馈线容量边 界和潮流方向约束边界向第一象限方向移动,进而 缩小运行域;当MG<sub>27</sub>运行在区域II时,PQ型二维 TSC-MGSOR向第一象限方向移动;当MG<sub>27</sub>运行在区 域IV时,PQ型二维TSC-MGSOR向第一象限方向移



动,且随着 MG27发出功率的增加,潮流方向边界和 馈线容量边界向第三象限方向移动,运行域缩小,且 在观测点4处无解。

MG<sub>27</sub>运行在不同观测点时对 PV 型二维 TSC-MGSOR 的影响如附录 E 图 E3 所示。由图可知:当 MG<sub>27</sub>运行在负半轴时, PV 型二维 TSC-MGSOR 向第 一象限方向移动;当 MG<sub>27</sub>运行在正半轴时, PV 型二 维 TSC-MGSOR 向第三象限方向移动。上述仿真结 果验证了 3.3 节中 PQ 型和 PV 型二维 TSC-MGSOR 影 响机理分析方法的有效性和正确性。

#### 5 结论

本文综合考虑 RES 发电时序特性对 MG 发用电 状态的影响,提出 TSC-MGSOR 模型,在此基础上,分 析 MG 接入对一维 / 二维 TSC-MGSOR 的影响机理, 主要结论如下。

1)本文提出的TSC-MGSOR模型能够精确描述 不同时刻的MG安全运行调节范围,有效提高了MG N-0安全运行状态评估的可靠性,能够为含MG的配 电网调度运行提供一定的理论指导。

2)PQ型TSC-MGSOR主要由RES发电时序特性 约束边界以及系统电压约束边界构成;PV型TSC-MGSOR主要由RES发电时序特性约束边界以及馈 线容量约束边界构成。在相同条件下,PV型TSC-MGSOR比PQ型TSC-MGSOR的范围更大。相较于 单一类型的RES安全运行域,MG安全运行域具有 更加灵活的时序特性。

3)MG 接入对 TSC-MGSOR 的影响与其接入类型、接入位置和支路阻抗有关。MG 接入对 PQ 型 TSC-MGSOR 的影响主要是通过系统电压约束改变运行域范围,而对 PV 型 TSC-MGSOR 的影响主要是通过馈线容量约束改变运行域范围。

此外,本文提出的TSC-MGSOR模型及其影响机 理可以拓展到单一类型DG和储能系统,为其运行 控制和规划提供一定的理论依据。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

[1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统 的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904, 2205.

ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7):1893-1904, 2205.

- [2] 李政,陈思源,董文娟,等.碳约束条件下电力行业低碳转型路 径研究[J].中国电机工程学报,2021,41(12):3987-4001.
   LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(12):3987-4001.
- [3] JENKINS J D, LUKE M, THERNSTROM S. Getting to zero carbon emissions in the electric power sector[J]. Joule, 2018,

2(12):2498-2510.

- [4] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和 二〇三五年远景目标的建议[EB/OL]. [2020-11-03]. http:// www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content\_5556991.htm.
- [5] Energy Transitions Commission. China 2050: a fully developed rich zero-carbon economy[R]. Beijing:ETC,2019.
- [6] 唐翀. 多主体参与的中低压电网分散式优化运行方法研究
   [D]. 广州:华南理工大学,2020.
   TANG Chong. Research on decentralized optimal operation method for medium and low voltage power grids with multiple owner participation[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2020.
- [7] 赵毅,于继来. 多微网智能配电系统协同自律运控模式初探
   [J]. 电网技术,2018,42(4):1200-1209.
   ZHAO Yi,YU Jilai. Preliminary research on operation and control model of coordination and self-discipline for smart distribution system with multi microgrids[J]. Power System Technology,2018,42(4):1200-1209.
- [8] 廖剑波,陈冰斌,戴小青,等.考虑配电商参与的主动配电网多 层分区调控[J].电力自动化设备,2021,41(3):41-48.
   LIAO Jianbo, CHEN Bingbin, DAI Xiaoqing, et al. Multi-tier and partitioned dispatch and control of active distribution network considering participation of distributors[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(3):41-48.
- [9] XING H J, FAN H, SUN X, et al. Optimal siting and sizing of distributed renewable energy in an active distribution network[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3):380-387.
- [10] MALIK M Z,KUMAR M,SOOMRO A M,et al. Strategic planning of renewable distributed generation in radial distribution system using advanced MOPSO method [J]. Energy Reports, 2020,6:2872-2886.
- [11] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用
  [J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
  LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.
- [12] WANG Z Y, CHEN B K, WANG J H, et al. Coordinated energy management of networked microgrids in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 45-53.
- [13] 马钊,周孝信,尚字炜,等.未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.
  MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system [J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(6):1289-1298.
- [14] 梅生伟,王莹莹. 输电网-配电网-微电网三级电网规划的若干基础问题[J]. 电力科学与技术学报,2009,24(4):3-11.
   MEI Shengwei, WANG Yingying. Several basic problems of three-level power network planning of transmission network-distribution network-microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2009,24(4):3-11.
- [15] 王枫,祁彦鹏,傅正财.考虑微电网非计划解列运行的配电网 可靠性评估[J].电力自动化设备,2013,33(9):13-19.
  WANG Feng, QI Yanpeng, FU Zhengcai. Reliability evaluation of distribution system considering unintentional splitting operation of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(9):13-19.
- [16] 王枫,祁彦鹏,傅正财.考虑微电网功率控制模式的配电网可 靠性评估[J].电力系统自动化,2012,36(23):48-53.
   WANG Feng, QI Yanpeng, FU Zhengcai. Reliability evaluation of distribution system considering microgrid power control mode

[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23):48-53.

[17] 袁修广,黄纯,张磊,等. 计及微网孤岛运行方式的配电网可靠 性评估[J]. 电网技术,2015,39(3):690-697.
YUAN Xiuguang,HUANG Chun,ZHANG Lei, et al. Reliability evaluation of distribution network considering islanded operation of microgrid[J]. Power System Technology,2015,39(3): 690-697

168

- [18] 王韶,谭文,黄晗. 计及微电网中可再生能源间歇性影响的配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):31-37.
   WANG Shao, TAN Wen, HUANG Han. Distribution system reliability evaluation considering influence of intermittent renewable energy sources for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):31-37.
- [19] 闫涛,唐巍,王越,等. 基于储能多状态模型的含微网配电系统 可靠性评估[J]. 电网技术,2017,41(7):2222-2228.
   YAN Tao,TANG Wei,WANG Yue, et al. Reliability evaluation of distribution network with microgrid based on multistate energy storage model[J]. Power System Technology,2017, 41(7):2222-2228.
- [20] 陈碧云,周恒旺,李滨.考虑微网市场交易影响的配电网可靠 性分析[J].电力系统自动化,2019,43(18):43-50,59.
  CHEN Biyun, ZHOU Hengwang, LI Bin. Reliability analysis of distribution network considering impact of market transaction in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(18):43-50,59.
- [21] 刘佳,程浩忠,李思韬,等.考虑N-1安全约束的分布式电源出 力控制可视化方法[J].电力系统自动化,2016,40(11):24-30.
  LIU Jia, CHENG Haozhong, LI Sitao, et al. Visualization method of output power control of distributed generators considering N-1 security constraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11):24-30.
- [22] 王博,肖峻,周济,等.主动配电网中分布式电源和微网的运行 域[J]. 电网技术,2017,41(2):363-372.
   WANG Bo,XIAO Jun,ZHOU Ji, et al. Dispatchable region of distributed generators and microgrids in distribution systems

[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 363-372.

- [23] 赵福林,张通,马光,等.考虑源-荷波动的电力系统灵活性运 行域研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2021,55(5):935-947. ZHAO Fulin,ZHANG Tong, MA Guang, et al. Study on flexible operation region of power system considering source and load fluctuation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2021,55(5):935-947.
- [24] 王守相,黄丽娟,王成山,等.分布式发电系统的不平衡三相潮流计算[J].电力自动化设备,2007,27(8):11-15.
   WANG Shouxiang, HUANG Lijuan, WANG Chengshan, et al. Unbalanced three-phase power flow calculation for distributed power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(8):11-15.
- [25] 赵黄江,向月,刘俊勇,等. 基于改进配电网安全域的规模化电 动汽车入网影响分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):66-73. ZHAO Huangjiang, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Analysis on impact of large-scale electric vehicles integration based on improved security region of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(11):66-73.

#### 作者简介:



郑舜玮(1995—),男,博士研究生,主 要研究方向为含多微电网的配电系统优化 运行控制(E-mail: zheng\_shunwei@foxmail. com):

廖 凯(1989—),男,副教授,博士,通信 作者,主要研究方向为电力系统分析、稳定 与控制等(E-mail:liaokai\_lk@hotmail.com); 杨健维(1983—),女,教授,博士,主要

研究方向为新能源电力系统保护与控制、城

市电网安全预警、电动汽车并网(E-mail:jwyang@swjtu.edu. com)。

(编辑 王锦秀)

### Time sequence characteristic-based microgrid safety operation region model and influence mechanism analysis

ZHENG Shunwei, LIAO Kai, YANG Jianwei, ZHAO Qianlin, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to determine the safety operation range of microgrid accessed to distribution network under different time sequences, and analyze the operation interaction influence between different microgrids, the distribution system with microgrid is taken as the research object, and the time sequence characteristicbased microgrid safety operation region (TSC-MGSOR) model and its influence mechanism analysis method are proposed. The external characteristic of microgrid is modeled to describe the power generation and consumption states of microgrid at different moments. On the basis of fully considering the influence of time sequence characteristic of renewable energy generation on the external characteristic of microgrid, the concept and model of TSC-MGSOR are proposed, and the solving algorithm of the model is given. On the basis of the proposed TSC-MGSOR model, the influence mechanism of microgrid access on one / two-dimensional TSC-MGSOR is analyzed. Simulation and verification are carried out based on a modified IEEE 33-bus system, and the results show that the proposed TSC-MGSOR model can accurately describe the safety operation range of microgrid at different moments, and the proposed influence mechanism analysis method of one / two-dimensional TSC-MGSOR can effectively analyze the influence of different access modes of microgrid on one / two-dimensional TSC-MGSOR.

Key words: distributed power generation; distribution network; microgrid; time sequence characteristic; safety operation region; influence mechanism



图 A1 含微电网的配电网架构示意图

Fig.A1 Schematic diagram of distribution network with microgrids



Fig.A2 Solving flowchart of TSC-MGSOR

以二维 TSC-MGSOR 作为研究对象,通过提出仿真算法拟合计算各约束边界,求解得到二维 TSC-MGSOR。具体求解步骤如下:

步骤 1: 工作点初始化。初始化运行时刻 t,并将工作点初始化为(R<sub>IP.1</sub>, R<sub>IP.2</sub>)。

步骤 2: 刻画 MG 发电时序特性。根据风速、光照、温度等自然数据刻画 MG 发电时序特性,确定 *t* 时刻下的 MG 发电时序约束上下边界。

步骤 3: 电压下限约束边界求解。通过潮流计算分析,求解系统节点电压最小值 $U_{\text{DN,min}}$ ,判断条件  $U_{\text{DN,min}} \ge U_{\text{min}}$ 是否满足。若满足条件,则记录此次迭代的电压下限边界临界工作点( $S_1, S_2$ );否则,通过增加步长 $\Delta S$ ,更新 $S_2$ ,继续进行系统潮流计算分析,直至条件 $U_{\text{DN,min}} \ge U_{\text{min}}$ 满足或者 $S_2$ ,超出其容量限制。

步骤 4: 电压上限约束边界求解。初始化  $S_2$ ,通过潮流计算求解系统节点电压最大值  $U_{\text{DN,max}}$ ,进行  $U_{\text{DN,max}} \ge U_{\text{max}}$ 判断,直至条件  $U_{\text{DN,max}} \ge U_{\text{max}}$ 满足或者  $S_2$ 超出其容量限制,并记录满足条件的电压上限边界 临界工作点。

步骤 5: 潮流方向约束边界求解。将  $S_2$ 进行初始化,求解馈线出口潮流  $S_{L1}$ ,若  $S_{L1} \ge 0$ ,则增加步长  $\Delta S_2$ 更新  $S_2$ ,直至  $S_{L1}$ 为负或者  $S_2 > S_{2,max}$ ;若  $S_{L1} < 0$ ,则记录此时潮流方向约束下的临界工作点( $S_1, S_2$ ),并进行步骤 6。

步骤 6: 馈线容量约束下边界求解。初始化  $S_2$ ,求解馈线潮流最大值  $S_L$ ,进行 sum( $S_L \leq S_{max}I_H$ ) = H 条件判断,记录满足条件的临界工作点,并跳转步骤 7;否则,更新  $S_2$ 进行循环求解,直至判断条件满足或  $S_2$ 越限。

步骤 7: 馈线容量约束上边界求解。增加  $S_2$  步长并进行  $S_2 \leq S_{2,max}$  判断, 若条件满足则求解馈线潮流  $S_L$ , 直至出现满足 sum( $S_L \geq S_{max}I_H$ ) ≥1的馈线容量约束上边界临界工作点并记录; 否则, 通过增加步长  $\Delta S_1$ 更 新  $S_1$ , 并跳转至步骤 3, 循环计算直至  $S_1$  越限,并得到 t 时刻下的电压下限约束边界工作点集合  $V_{L,t}$ 、电压上限约束边界工作点集合  $V_{U,t}$ 、潮流方向约束边界工作点集合  $C_{P,t}$ 、馈线容量约束下边界工作点集合  $L_{L,t}$ 、馈线容量约束上边界工作点集合  $L_{U,t}$ 。

最后,根据上述求得的各约束临界工作点集合,拟合得到各约束边界,进一步得到 *t* 时刻下的 TSC-MGSOR;并更新时刻 *t* 进行循环计算 *t*+1 时刻下的 TSC-MGSOR。

一维及高维 TSC-MGSOR 均可通过上述方法进行相应拓展求解。



Fig.B1 Equivalent schematic diagram of topological lines under different scenarios









附录 D



图 D1 4.1 节算例系统拓扑结构示意图 Fig.D1 Schematic diagram of system topology for case at Chapter 4.1

Table D1 Simulative results of one-dimensional TSC-MGSOR for MG <sub>16</sub>									
时间	PQ 型一维 TSC-MGSOR		PV 型一维 TSC-MGSOR		n-b X-1	PQ 型一维 TSC-MGSOR		PV 型一维 TSC-MGSOR	
	运行域/kW	运行域长度/kW	运行域/kW	运行域长度/kW	时间	运行域/kW	运行域长度/kW	运行域/kW	运行域长度/kW
1	660~1 376	716	-420~1 376	1 796	13	660~2 050	1 390	-420~2 302	2 722
2	660~1 311	651	-420~1 311	1 731	14	660~2 050	1 390	-420~2 429	2 849
3	660~1 216	556	-420~1 216	1 636	15	660~2 050	1 390	-420~2 544	2 964
4	660~1 110	450	-420~1 110	1 530	16	660~2 050	1 390	-420~2 625	3 045
5	660~1 004	344	-420~1 004	1 424	17	660~2 050	1 390	-420~2 646	3 066
6	660~880	220	-420~880	1 300	18	660~2 050	1 390	-420~2 587	3 007
7	660~756	96	-420~756	1 176	19	660~2 050	1 390	-420~2 407	2 827
8	660~702	42	-420~702	1 122	20	660~2 050	1 390	-420~2 144	2 564
9	660~864	204	-420~864	1 284	21	660~1 823	1 163	-420~1 823	2 243
10	660~1 318	658	-420~1 318	1 738	22	660~1 552	892	-420~1 552	1 972
11	660~1 873	1 213	-420~1 873	2 293	23	660~1 405	745	-420~1 405	1 825
12	660~2 050	1 390	-420~2 171	2 591	24	660~1 386	726	-420~1 386	1 806





图 D2 4.3 节算例系统拓扑结构示意图 Fig.D2 Schematic diagram of system topology for case at Chapter 4.3





图 D4 4.4 节算例 4.4 系统拓扑结构示意图 Fig.D4 Schematic diagram of system topology for case at Chapter 4.4

Table D2 Main parameters setting of MG <sub>25</sub>					
参数	含义	取值			
$P_{\rm WT,25}$	MG25内的风机装机容量	3 000 kW			
$P_{\rm PV,25}$	MG25内的光伏装机容量	2 500 kW			
$P_{\rm BSS,25}$	MG25内的储能额定功率	500 kW			
$E_{\mathrm{BSS},25}$	MG25内的储能额定容量	3 000 kW			
$\max(L_{25})$	MG25内的负荷最大值	$1\ 000\ kW$			
$p_{\rm LD,15}(17)$	17 时刻下 MG25 内的负荷需求	879.32 kW			
$S_{\rm OC,25}(17)$	17 时刻下 MG25 内储能 SOC	49.70%			

表 D2 MG<sub>25</sub>主要参数设置



图 E1 PQ/PV 型 MG<sub>16</sub>和 MG<sub>25</sub>的二维 TSC-MGSOR Fig.E1 Two-dimensional TSC-MGSOR of PQ/PV-type MG<sub>16</sub> and MG<sub>25</sub>

在图 E1 中: L1 和 L2 分别为 MG<sub>25</sub> 中的 RES 发电时序特性约束下边界和上边界; L3 和 L4 分别为 MG<sub>16</sub> 中的 RES 发电时序特性约束下边界和上边界; L5 和 L6 分别为系统电压约束下边界和上边界; L7 为潮流方向约束边界; L8 和 L9 分别为馈线容量约束下边界和上边界。



Fig.E2 Variation comparison of PQ-type two-dimensional TSC-MGSOR



图 E3 PV 型二维 TSC-MGSOR 变化对比 Fig.E3 Variation comparison of PV-type two-dimensional TSC-MGSOR

## 附录 E