

基于安全域的并网型微电网能量优化新方法

肖峻¹, 李瑾一¹, 宋晨辉²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:提出一种基于安全域的并网型微电网能量优化新方法。提出并网型微电网安全域的定义与模型, 分别对 $N-0$ 安全与 $N-1$ 安全的微电网安全域进行刻画; 考虑微电网的安全性、经济性, 以微电网经济效益与馈线安全距离为优化目标, 建立一种基于安全域的微电网能量优化模型, 在规划安全域范围内采用YALMIP工具箱与CPLEX求解器对模型进行求解。算例展示了微电网安全域, 验证了能量优化模型的有效性。相较于现有方法, 所提方法能够量化系统安全裕度, 综合考虑微电网的安全裕度与经济效益。

关键词:并网型微电网; 安全域; 能量优化; 经济效益; 安全距离

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202210018

0 引言

微电网在国内外发展迅速, 对保证用电安全、提高能源利用效益和消纳可再生能源具有重要作用, 显示出良好的环境效益和应用前景^[1]。制定安全可靠、经济高效的能量优化方案, 是微电网运行的难点和关键问题。在实际运行中, 风力、光伏等多种类型分布式电源(distributed generator, DG)的并网以及储能系统(energy storage system, ESS)的参与调节, 使得微电网优化运行变得更加复杂化。间歇性DG的随机出力、线路与DG元件的随机故障等因素带来的安全问题也日益突出^[2-3], 这些问题对微电网安全高效运行提出了更高的要求。

电力系统的运行安全指在突发性故障(例如突然短路或非计划失去电力系统元件)引起的扰动下, 系统应具有不发生广泛波及性供电中断的能力^[3]。对微电网安全性的要求与电力系统一致, 即在突发扰动下微电网能实现对用户的不间断供电^[2,4], 且并网运行时微电网能够在扰动后仍然保持电压等运行参数稳定于安全范围内, 无需向孤岛模式切换^[5]。对并网型微电网的安全状态做出快速准确判断, 能为其预防控制和孤岛决策提供重要理论依据。现有研究主要考虑微电网 $N-1$ 故障, 通过建立预想故障集进行故障分析和安全风险评估^[2,6], 但未考虑配电网与其他微电网的影响, 研究成果在并网及多微电网场景下难以应用。

传统能量优化方法通过引入正常运行的安全约束保障微电网安全^[7-8], 但这种方法难以获取系统当前的安全裕度, 当运行状态位于安全边界附近时, 系

统易受扰动而导致不安全^[9]。文献[8]在模型中兼顾电压安全裕度与失负荷率的安全指标; 文献[10]建立考虑线路传输安全裕度的微电网多目标优化模型。上述方法均依赖于DG与负荷的预测输入, 一旦实际出力波动较大就可能需要重新运行求解, 计算开销也随之大幅增加。文献[11]针对电动汽车充电导致的负荷波动和经济效益之间的矛盾问题, 构建多目标规划模型。

安全域方法为微电网安全优化运行提供了一种新思路。对于结构确定的网络, 其安全域也是唯一确定的, 工作点的安全与否通过工作点与安全域的位置关系进行直观描述。安全域方法为优化调度系统的实时安全监控与预防控制提供了一种很好的理论方法及可视化工具^[9,12]。

安全域已应用于配电网、天然气网、综合能源系统等领域, 显示出其在处理复杂系统安全问题时的有效与便捷^[13-15]。安全域在微电网领域的应用也已有初步探索。文献[16]在配电网安全域的基础上建立DG与微电网的运行域模型; 文献[17]针对含微电网的配电系统展开安全边界计算与观测, 提出基于安全边界的不安全风险指标, 并由此研究微电网参与下的故障恢复策略。上述研究关注的对象为微电网接入的配电网安全域, 而未涉及微电网内部拓扑结构, 这些研究仍属于配电系统安全域研究的延续。目前关于微电网自身安全域的研究较少。文献[18]针对孤立微电网, 提出小干扰安全域的鲁棒稳定判据与自适应覆盖算法; 文献[19]提出微电网转换安全域, 以微电网总有功/无功作为孤岛转换稳定判据。上述研究未对微电网安全域进行完整建模, 未考虑 $N-1$ 安全。

本文提出一种基于安全域的并网型微电网能量优化新方法。首先, 针对微电网介绍 $N-1$ 安全域理论的基本内容, 包括域模型、边界表达式和可视化; 然后, 以经济效益与安全裕度为优化目标, 建立基于

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-08-22

在线出版日期: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177105, 52007130)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52177105, 52007130)

安全域的多目标能量优化模型;最后进行算例验证。

1 微电网的安全性

1.1 微电网结构及并网运行特征

微电网是由负荷、DG、ESS等集成的小型发电系统^[1],一般为辐射状结构,由公共耦合点通过静态开关与配电网相连。微电网节点包括以下4种。

1) 负荷:含常规负荷和可调负荷。

2) DG:多种能源形式的小型独立电源,如柴油发电机、风机等。

3) ESS:并网时具有能量调度的作用,主要包括蓄电池和超级电容。

4) 下级子微电网(subordinate microgrid, SMG):本文分析时忽略SMG内部结构,而关注其并网点功率大小,因此将SMG整体等效为节点考虑,并采用“DG-负荷”模型进行描述。

本文主要对并网型微电网进行研究,采用典型的微电网结构^[20],如图1所示。图中:微电网MG₁、MG₂通过公共耦合点(PCC₁、PCC₂)并网运行;B₁—B₆为微电网线路;K₁为微电网间的联络开关;f₁—f₃为3类故障;节点考虑负荷(L₁—L₃)、DG(DG₁、DG₂)、ESS、SMG这4种类型。

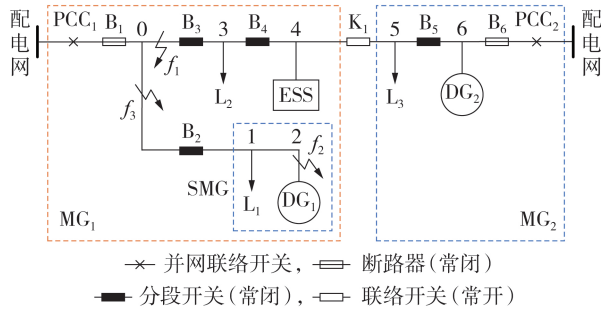


图1 典型并网型微电网结构

Fig.1 Structure of typical grid-connected microgrid

正常运行时,微电网MG₁、MG₂并入配电网运行,MG₁、MG₂之间的联络开关K₁断开,MG₁与MG₂之间无功率流动。故障发生时,开关动作的依据为最大限度保证并网安全运行。图1中微电网存在如下3类故障。

f₁:线路故障,故障下游区通过开关K₁并入互联微电网继续并网运行,此时,负荷仍然可以通过并网侧的配电网供电,MG₁与MG₂之间无功率交互。

f₂:DG故障后离网,不影响非故障区的并网状态。

f₃:线路故障,故障下游解列后形成独立子微电网,微电网保持并网状态。

1.2 工作点与状态空间

工作点W指能表征系统安全状态的最少状态变量的集合。对于配电网安全域,工作点一般选取馈

线或馈线段负荷;对于有源配电网安全域,工作点选取节点净功率^[9,13]。对于微电网,工作点选取有源配电网的节点净功率,即:

$$W = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n\} \quad i \in N_d \quad (1)$$

$$P_i = \begin{cases} P_{\text{load},i} & i \in L \\ P_{\text{DG},i} & i \in G \\ P_{\text{ESS},i} & i \in E \\ P_{\text{pcc},i} & i \in I \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i 为节点*i*的净功率; n 为微电网节点数; N_d 为微电网所有节点集合; $P_{\text{load},i}$ 、 $P_{\text{DG},i}$ 、 $P_{\text{ESS},i}$ 、 $P_{\text{pcc},i}$ 分别为负荷、DG、ESS、SMG这4种类型节点*i*的功率; L 为负荷节点集合; G 为DG节点集合; E 为ESS节点集合; I 为SMG并网节点集合。

由于受到配电变压器、DG等元件容量约束,各节点功率被限制在一定范围之内。所有节点容量允许范围内的工作点组成一个有界集合,称为微电网运行的状态空间,记为 Θ 。规定节点功率流出为正,则 Θ 可表示为式(3)—(6)。

$$0 \leq P_{\text{load},i} \leq P_{\text{load},i}^{\text{max}} \quad i \in L \quad (3)$$

$$-P_{\text{DG},i}^{\text{max}} \leq P_{\text{DG},i} \leq 0 \quad i \in G \quad (4)$$

$$-P_{\text{ESS},i}^{\text{dmax}} \leq P_{\text{ESS},i} \leq P_{\text{ESS},i}^{\text{cmax}} \quad i \in E \quad (5)$$

$$-P_{\text{pcc},i}^{\text{dmax}} \leq P_{\text{pcc},i} \leq P_{\text{pcc},i}^{\text{cmax}} \quad i \in I \quad (6)$$

式中: $P_{\text{load},i}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{DG},i}^{\text{max}}$ 分别为负荷、DG节点*i*的功率上限; $P_{\text{ESS},i}^{\text{dmax}}$ 、 $P_{\text{ESS},i}^{\text{cmax}}$ 分别为ESS节点*i*的放电、充电功率上限; $P_{\text{pcc},i}^{\text{dmax}}$ 、 $P_{\text{pcc},i}^{\text{cmax}}$ 分别为SMG并网点注入、流出节点*i*的功率上限。

1.3 并网型微电网的安全性

1.3.1 潮流模型的选择

并网型微电网的安全问题需考虑线路传输功率与节点电压,可通过交流潮流模型进行安全分析^[8],也有文献通过直流潮流的近似模型^[7,10]进行研究。一方面,由于实际很多微电网的线路较短,压降较小且可通过无功补偿设备进行调压,当供电半径和DG路径线路长度小于临界长度时,容量约束强于电压约束^[21],此时采用直流潮流计算误差不大。另一方面,从安全域刻画的完整程度来看,交流潮流的非线性难以得到安全域的解析式,很难完整刻画全部安全域,而基于线性的直流潮流模型则不存在这个问题。因此,本文也采用直流潮流模型,并在算例中利用交流潮流来校验直流潮流模型所得结果的误差。

1.3.2 N-0安全性

微电网N-0安全指正常并网运行时线路及各类元件均不超出其功率安全限制。N-0约束如下。

1) 功率平衡等式约束,即:

$$P_m^{\text{pcc}} = \sum_{i \in L \cup G \cup E \cup I} P_i \quad m \in M \quad (7)$$

式中: P_m^{pcc} 为微电网与配电网之间联络线*m*的交换功率; M 为微电网并网联络线集合。

2) 线路容量约束, 即:

$$P_m^{\text{pmin}} \leq P_m^{\text{pec}} \leq P_m^{\text{pmax}} \quad (8)$$

$$\left| P_{B_s} \right| = \left| \sum_{j \in A_{B_s}} P_j \right| \leq c_{B_s} \quad B_s \in B \quad (9)$$

式中: P_m^{pmax} 、 P_m^{pmin} 分别为并网联络线 m 传输功率上、下限; P_{B_s} 为线路 B_s 的功率; A_{B_s} 为线路 B_s 下游节点集合; c_{B_s} 为线路 B_s 的容量; B 为线路集合。

3) DG 出力、ESS 充放电功率及其余微电网交换功率约束, 如式(4)~(6)所示。

1.3.3 N-1 安全性

微电网 $N-1$ 安全指微电网系统发生任意单次故障后, 非故障区域负荷仍能持续供电并满足安全约束。 $N-1$ 约束如下。

1) 线路容量约束, 即:

$$\left| P_{B_s}(k) \right| = \left| \sum_{j \in A_{B_s}(k)} P_j \right| \leq c_{B_s} \quad B_s \in B, \psi_k \notin B \quad (10)$$

式中: $P_{B_s}(k)$ 为故障 k 发生后线路 B_s 的功率; $A_{B_s}(k)$ 为故障 k 发生后线路 B_s 下游节点集合; ψ_k 为故障元件。

2) 独立子微电网功率约束。

故障 f_3 发生后, 微电网一部分(图1中 MG_1) 独立运行。独立子微电网功率约束指其内部负荷功率不能超过 DG 及 ESS 的最大发电功率, 表示为:

$$\sum P_{\text{load}, i} \leq \sum P_{\text{DG}, i}^{\text{max}} + \sum P_{\text{ESS}, i}^{\text{dmax}} \quad i \in A_{\text{ns}} \quad (11)$$

式中: A_{ns} 为故障 f_3 发生后出现的独立子微电网节点集合。

需要指出的是, 独立子微电网功率约束适用于子微电网内 DG 为微型燃气轮机、冷热电联产发电机、柴油发电机、燃料电池等稳定出力型 DG, 或稳定出力型 DG 有足够高占比的场景, 旨在保障被迫孤岛的子微电网无失负荷风险。而当子微电网内 DG 为风电、光伏等间歇性 DG 时, 上述安全目标则无法保证。

2 微电网安全域的定义与模型

2.1 微电网安全域的定义

微电网 $N-1$ 安全域定义为: 在状态空间 Θ 中, 满足 $N-0$ 安全与 $N-1$ 安全的工作点 W 的集合。域需有封闭的边界, 边界内和边界上的工作点均安全, 边界外的点均不安全。

微电网 $N-0$ 安全域定义为: 在状态空间 Θ 中, 满足 $N-0$ 安全的工作点 W 的集合。域需具有封闭的边界, 边界内和边界上的工作点均安全, 边界外的点均不安全。 $N-0$ 安全域也称为运行域^[16]。

2.2 微电网安全域的模型

微电网 $N-1$ 安全域模型表示为:

$$\Omega_{\text{GMSR}} = \{W = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n\} \subset \Theta\} \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} P_m^{\text{pmin}} \leq P_m^{\text{pec}} \leq P_m^{\text{pmax}} \\ \left| P_{B_s} \right| = \left| \sum_{j \in A_{B_s}} P_j \right| \leq c_{B_s} \quad B_s \in B \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \left| P_{B_s}(k) \right| = \left| \sum_{j \in A_{B_s}(k)} P_j \right| \leq c_{B_s} \quad B_s \in B, \psi_k \notin B \\ \sum P_{\text{load}, i} \leq \sum P_{\text{DG}, i}^{\text{max}} + \sum P_{\text{ESS}, i}^{\text{dmax}} \quad i \in A_{\text{ns}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: Ω_{GMSR} 为微电网 $N-1$ 安全域。式(12)表示工作点所在的状态空间; 式(13)为正常运行的 $N-0$ 安全约束; 式(14)为 $N-1$ 安全约束, 满足 $N-1$ 故障下线路不越限、被迫孤岛的子微电网负荷不断电等安全约束。

微电网 $N-0$ 安全域模型包括状态空间和 $N-0$ 安全约束, 因此只需在微电网 $N-1$ 安全域模型中除去式(14)所示 $N-1$ 约束即可。

2.3 安全距离与安全裕度

当微电网 $N-1$ 、 $N-0$ 安全域模型中的不等式约束取等号时, 即可得到安全边界, 分别如式(15)、(16)所示。

$$\begin{cases} \Omega_{\text{CGMSR}} = \beta_1 \cup \beta_2 \cup \beta_3 \cup \beta_4 \cup \beta_5 \\ \beta_1 = \left\{ W \subset \Omega_{\text{GMSR}} \mid P_m^{\text{pmin}} = \sum_{i \in LUGUEUI} P_i \right\} \\ \beta_2 = \left\{ W \subset \Omega_{\text{GMSR}} \mid P_m^{\text{pmax}} = \sum_{i \in LUGUEUI} P_i \right\} \\ \beta_3 = \left\{ W \subset \Omega_{\text{GMSR}} \mid P_{B_s} = \sum_{j \in A_{B_s}} P_j = \pm c_{B_s}, B_s \in B \right\} \\ \beta_4 = \left\{ W \subset \Omega_{\text{GMSR}} \mid P_{B_s}(k) = \sum_{j \in A_{B_s}(k)} P_j = \pm c_{B_s}, B_s \in B, \psi_k \notin B \right\} \\ \beta_5 = \left\{ W \subset \Omega_{\text{GMSR}} \mid \sum P_{\text{load}, i} = \sum P_{\text{DG}, i}^{\text{max}} + \sum P_{\text{ESS}, i}^{\text{dmax}}, i \in A_{\text{ns}} \right\} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Omega_{\text{CGMSR0}} = \beta_{10} \cup \beta_{20} \cup \beta_{30} \\ \beta_{10} = \left\{ W \subset \Omega_{\text{GMSR0}} \mid P_m^{\text{pmin}} = \sum_{i \in LUGUEUI} P_i \right\} \\ \beta_{20} = \left\{ W \subset \Omega_{\text{GMSR0}} \mid P_m^{\text{pmax}} = \sum_{i \in LUGUEUI} P_i \right\} \\ \beta_{30} = \left\{ W \subset \Omega_{\text{GMSR0}} \mid P_{B_s} = \sum_{j \in A_{B_s}} P_j = \pm c_{B_s}, B_s \in B \right\} \end{cases} \quad (16)$$

式中: Ω_{CGMSR} 为 $N-1$ 完整安全边界; Ω_{CGMSR0} 为 $N-0$ 完整安全边界; $\beta_1 \sim \beta_5$ 为对应于不同 $N-1$ 安全约束的 5 类子边界; β_{10} 、 β_{20} 、 β_{30} 为对应于不同 $N-0$ 安全约束的 3 类子边界; Ω_{GMSR0} 为微电网 $N-0$ 安全域; $W \subset \Omega_{\text{GMSR}}$ 、 $W \subset \Omega_{\text{GMSR0}}$ 确保等式约束在安全域范围内, 完整边界需对所有子边界取并集。

设所获得的安全边界表达式共包含 r 个等式(边界),则对于第 k 条边界 β_{nk} ,计算工作点延轴向 P_i 到该平面的距离 $d_k = R_k - \sum_{j \neq i, P_j \in \beta_{nk}} P_j - P_i$,其中 R_k 为等效后的第 k 个等式中非自变量常数部分,对于 $N-1$ 安全边界 $R_k \in \{P_m^{\min}, P_m^{\max}, \pm c_B, \sum P_{DG,i}^{\max} + \sum P_{ESS,i}^{\max}\}$,对于 $N-0$ 安全边界 $R_k \in \{P_m^{\min}, P_m^{\max}, \pm c_B\}$ 。具体推导过程如附录 A 式(A1)、(A2)所示。

馈线安全距离定义为工作点延轴向到安全边界的距离大小^[22]。工作点的任意分量 P_i 都对应一个馈线安全距离,记作 D_i , D_i 为工作点延 P_i 到所有安全边界的最短距离,表示为:

$$D_i = \min \left\{ \left(R_1 - \sum_{j \neq 1, P_j \in \beta_{a1}} P_j - P_1 \right), \left(R_2 - \sum_{j \neq 2, P_j \in \beta_{a2}} P_j - P_2 \right), \dots, \left(R_r - \sum_{j \neq r, P_j \in \beta_{ar}} P_j - P_r \right) \right\} = \min \{d_1, d_2, \dots, d_r\} \quad (17)$$

平均馈线距离 D^a 与最小馈线距离 D^m 均从系统整体角度量化微电网安全程度,分别表示为:

$$D^a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (18)$$

$$D^m = \min \{D_i\} \quad (19)$$

最小馈线距离对微电网安全的影响更显著,因此本文采用最小馈线距离 D^m 来表征微电网安全裕度 δ ,如式(20)所示。

$$\delta = \min \{D_i\} \quad i \in N_d \quad (20)$$

3 基于安全域的能量优化模型

微电网能量优化通过协调其中的 DG 与 ESS 对可控 DG 进行输出控制,从而动态实现负荷、DG 以及 ESS 之间、微电网与主网之间的能量优化分配,使微电网安全经济运行。在能量优化中,考虑 $N-0$ 安全性更常见,这是由于考虑 $N-1$ 安全性时,安全域将明显缩小^[9,12],而 $N-1$ 故障发生的概率较小,考虑 $N-1$ 安全性会使优化结果的经济性大幅下降,因此,本文能量优化采用 $N-0$ 安全域, $N-1$ 安全域适用于对安全性有更高要求的情况。

模型中考虑并网型结构, DG 采用以柴油发电机为代表的可控 DG 和以风机为代表的不可控 DG, 负荷类型考虑常规负荷、关键负荷与可调负荷。电能一部分由微电网自身提供,另一部分向市场购得。

3.1 目标函数

传统的能量优化模型^[7]将安全因素作为约束,所得优化方案可能刚好满足安全约束,然而一旦负荷、DG 等不可控因素波动过大,就可能违反安全约束。而本文得到安全域后,通过计算安全距离能够量化安全裕度,可将安全裕度设定为最低阈值并作

为约束,还可将安全作为一个优化目标,所得方案能保证所需的安全裕度应对负荷、DG 波动的能力更强,安全性更好。本节建立基于微电网 $N-0$ 安全域的微电网能量优化新模型,将安全裕度作为一个子优化目标,以实现安全性和经济性的综合优化。

1) 经济效益目标。

与现有优化模型^[7]相同,子目标 1 以运营商经济效益最优为优化目标,表示为:

$$C = C_1 + C_2 - C_3 = \sum_{t=1}^T \lambda_{\text{sell}}^t \left(\sum_{i \in L} P_{\text{load},i}^t - \sum_{i \in L_c} \Delta P_{\text{load},i}^t \right) \Delta t + \sum_{t=1}^T \left(\Delta \alpha \sum_{i \in L_k} P_{\text{load},i}^t \Delta t \right) - \sum_{t=1}^T (H_1^t + H_2^t + H_3^t + H_4^t + H_5^t + H_6^t) \Delta t \quad (21)$$

式中: C 为微电网净利润,由常规电费收益 C_1 、对关键负荷高可靠供电的额外保障收益 C_2 与全天的运营成本 C_3 三部分组成; T 为优化周期时段数; λ_{sell}^t 为 t 时段的售电价格; L_c 为可调负荷节点集合; $\Delta P_{\text{load},i}^t$ 为节点 i 接受调节的负荷减少量; Δt 为各时段时长; $\Delta \alpha$ 为关键负荷额外保障费用; L_k 为关键负荷节点集合; $H_1^t - H_6^t$ 分别为 t 时段微电网向市场购电成本、可控 DG 运行成本、ESS 充放电成本、弃风成本、可调负荷调控补贴、可调负荷运行维护成本,具体表达式如附录 A 式(A3)所示。

2) 安全裕度目标。

基于安全域,子目标 2 引入馈线安全距离,以优化周期内的微电网安全裕度 δ 最大化为优化目标。

3) 目标函数。

分别以权重系数 ω_1, ω_2 反映经济效益与安全裕度对微电网的重要程度,各权重系数采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[23] 计算得出,步骤为:①建立 AHP 的层次结构,标准层包括经济效益与安全裕度两部分;②采用 1—9 标度法构建判断矩阵;③对判断矩阵进行一致性校验;④对权重进行排序。

计算前对各目标进行规范化处理^[24],如式(22)所示。

$$C' = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad \delta' = \frac{\delta - \delta_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \quad (22)$$

式中: C' 为经规范化处理后的微电网净利润目标; δ' 为经规范化处理后的微电网安全裕度目标; $C_{\max}, C_{\min}$ 和 $\delta_{\max}, \delta_{\min}$ 分别为原模型在单一目标 C 和 δ 下的最大、最小寻优解。结合 AHP 权重计算结果与子目标规范化处理结果,根据加权法建立目标函数 F ,如式(23)所示。

$$F = \max \{ \omega_1 C' + \omega_2 \delta' \} \quad (23)$$

可以看出,上述模型与现有模型^[7]在优化目标

上存在差异,上述模型通过改变权重系数模拟对微电网不同安全性、经济性的需求场景,当 ω_1 减小、 ω_2 增大时,优化重心向安全裕度方向偏移,当 ω_1 增大、 ω_2 减小时,优化重心向经济效益方向偏移,从而兼顾经济性与安全性。特别地,当 ω_1 取值为1、 ω_2 取值为0时,上述模型与文献[7]的目标函数一致。

3.2 约束条件

能量优化中,工作点不仅需满足式(13)的节点功率平衡约束、机组出力约束、线路容量约束,还需在优化周期内满足实时运行约束,具体表达式如附录A式(A4)~(A7)所示。

3.3 模型求解

上述能量优化模型是一个含有多个决策变量的多目标线性优化问题,待求解的目标函数包含经济效益与安全裕度两部分,因此,本文结合安全域计算与较为成熟的数学规划求解器,将模型求解分为如下3个阶段。

1)安全域计算:采用解析法^[9],借助安全域模型直接推导得到安全域与安全边界超平面的解析表达式。

2)权重系数等数据的准备:采用AHP^[23]计算目标函数权重系数,同时获取各时间断面下负荷值及不可控DG输出有功功率的预测值。

3)优化求解:输入上述安全域计算所得解析式结果、不可控DG预测功率、目标权重系数等准备数据,根据式(23)计算微电网能量优化的目标函数 F 与式(13)等约束条件,通过MATLAB编程求解。优化过程采用常用工具,利用YALMIP工具箱进行建模,并调用CPLEX求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 算例系统

选取图1所示的典型并网型微电网系统算例进行分析:MG₁与MG₂并网运行,两微电网通过开关K₁所在线路进行联络。DG、ESS等元件参数如附录B表B1所示,线路参数如附录B表B2所示。

4.2 安全域计算结果

4.2.1 N-0安全域

首先在状态空间内采样,计算各采样工作点的负荷总和,对于满足N-0安全约束的工作点,比较其负荷总和并保留较大值,最终获得的最大值即为最大供电能力。本文算例得到的最大供电能力为5.0 MV·A。同时得到最大供电能力的工作点 $W=\{2, -0.8, 1, 0.6, 2, -1.4\}$ MW。以 P_1 、 P_2 作为观测变量,其余节点取最大供电能力状态下的功率值,列写N-0安全域表达式,如式(24)所示。

$$\Omega_{\text{GMSR0}} = \left\{ W \in \Theta \left\{ \begin{array}{l} |P_1 + P_2| \leq 2 \text{ MW} \\ |P_3 + P_4| \leq 2 \text{ MW} \\ |P_5 + P_6| \leq 3 \text{ MW} \\ |P_1 + P_2 + P_3 + P_4| \leq 3 \text{ MW} \end{array} \right. \right\} \quad (24)$$

对式(24)中的不等式约束取等号,并除去与观测变量 P_1 、 P_2 无关的等式,安全边界如式(25)所示。

$$\beta_{N-0} = \left\{ W \in \Omega_{\text{GMSR0}} \left\{ \begin{array}{l} |P_1 + P_2| = 2 \text{ MW} \\ |P_1 + P_2 + 1.6| = 3 \text{ MW} \end{array} \right. \right\} \quad (25)$$

根据式(25)绘制N-0安全域,如图2所示。N-0安全域二维视图的形状为六边形,安全边界为斜边 Q_3Q_4 和 Q_5Q_6 ,达到最大供电能力的为线段 l 。

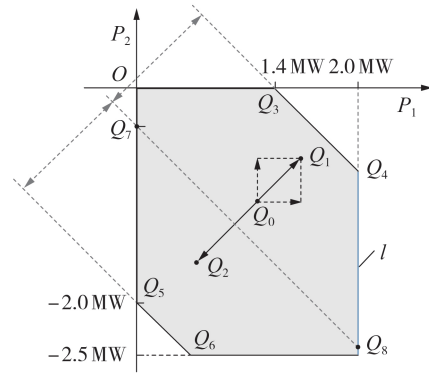


图2 N-0安全域二维视图

Fig.2 Two-dimensional view of N-0 security region

根据图2分析N-0安全域内工作点的安全性。工作点的安全性用该点到各边界(坐标轴除外)的最小距离表示。点 Q_0 沿 Q_0Q_1 向边界 Q_3Q_4 移动时,安全性降低;点 Q_0 沿反方向 Q_0Q_2 向边界 Q_5Q_6 移动时,安全性仍然降低。分析可知,N-0安全域内最安全的工作点位于中线 Q_7Q_8 上且距边界 Q_4Q_8 最远(即点 Q_7),由此向域内任一方向移动,安全性均降低,因此该点安全性最高。

4.2.2 N-1安全域

最大供电能力的计算过程与4.2.1节基本相同,区别仅在于将需满足的约束改为N-1安全域约束。经计算得到最大供电能力为3.5 MV·A,最大供电能力的工作点 $W=\{1.5, -1.5, 0, 0.8, 1.2, -1.1\}$ MW。仍将 P_1 、 P_2 作为观测变量,其余节点取最大供电能力状态下的功率值。

列写N-1安全域的完整表达式,如附录B表B3所示。N-1安全边界的完整表达式如附录B表B4所示。除去无效边界后的N-1安全边界为:

$$\beta_{N-1} = \left\{ W \in \Omega_{\text{GMSR}} \left\{ \begin{array}{l} |P_1 + P_2 + 2| = 2 \text{ MW} \\ |P_1 + P_2 - 1| = 3 \text{ MW} \end{array} \right. \right\} \quad (26)$$

根据式(26)绘制N-1安全域,如图3所示。

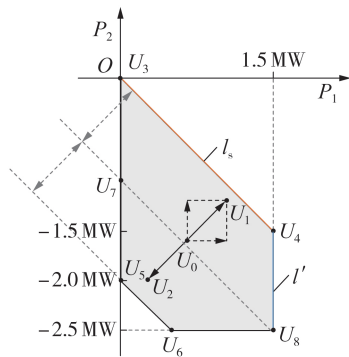


图3 N-1安全域二维视图

Fig.3 Two-dimensional view of N-1 security region

由图3可知:

1) N-1安全域是状态空间中由N-1安全边界分割状态空间边界形成的封闭区域,微电网N-1安全域二维视图的形状为五边形,安全边界为斜边 U_3U_4 和 U_5U_6 ,达到最大供电能力的为线段 l_s ;

2) N-1安全域分布于线段 l_s (斜率为-1)的下方空间,因此当馈线 B_2 发生故障时,节点1、2形成独立子微电网,安全域内任意工作点均可满足子微电网内负荷不断电的要求。

N-1安全域内工作点安全性的分析过程与N-0安全域内工作点安全性的分析过程相似,由工作点 U_7 向域内任一方向移动时,安全性均降低,因此点 U_7 处的安全性最高。

4.2.3 与交流潮流计算结果的对比验证

虽然本文采用直流模型,但是与交流潮流计算结果相比误差较小,算例的最大误差不超过4.04%,详细对比分析如附录C所示。误差较小的原因在于微电网系统线路较短,阻抗较小,功率输送造成的电压相位差较小^[1],因此线路网损较小,并且微电网自身具备调压能力^[1],并网点电压与微电网内节点电压容易保持在安全范围内。

4.3 基于安全域的能量优化

应用4.2节的安全域计算结果进行微电网能量优化计算。优化周期为1 d,将其分为24个时段。设定节点2、6的DG类型分别为风机、柴油发电机。节点3的负荷可调,其余负荷节点均为常规负荷。风电预测出力、各类负荷量及电价信息参考文献[7]的算例参数进行设置,分别如附录D图D1—D3所示。其余参数设置如附录D表D1所示。优化前,ESS、可调负荷不参与电网调度,微电网运行状态如附录D图D4所示。采用YALMIP工具箱与CPLEX求解器进行求解。

4.3.1 能量优化结果

首先采用AHP计算目标函数权重系数,如附录D的AHP计算权重过程所示,求得经济效益权重 $\omega_1=0.5$,安全裕度权重 $\omega_2=0.5$ 。在式(24)的N-0安全域

内搜索最优点。优化得到各类型DG出力、ESS及可调负荷功率如图4所示。微电网向日前市场统一购电,公共耦合点的交换总功率如附录D图D5所示。

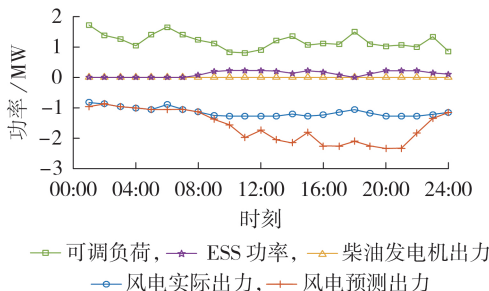


图4 基于安全域法的微电网能量优化结果

Fig.4 Energy optimization results of microgrid based on security region method

计算出优化前、后的总负荷、弃风量及目标函数相关指标值(即经济效益与安全裕度),结果如表1所示。

表1 优化前、后的相关指标

Table 1 Relevant indexes before and after optimization

情况	总负荷 / MW	弃风量 / MW	C / 元	δ / MW
优化前	52.889	1.264	5880	0.2725
优化后	53.978	1.046	7619	0.3137

由表1可知,相较于优化前,优化后总负荷提高了2.06%,弃风量减少了17.25%,经济效益、安全裕度目标值分别提高了29.57%、15.12%。

4.3.2 与现有方法的对比

将本文方法与文献[7]方法进行对比,文献[7]采用仅考虑经济效益目标的优化模型。由于AHP中不同专家评估下的判断矩阵存在差异,因此权重系数也有所不同,因此本文结合AHP不同标度下的权重计算结果(如附录D表D3所示),设置Case 1—4这4类场景。Case 1与文献[7]的偏好一致,均仅考虑经济效益。从Case 1到Case 4,权重偏好逐渐由经济性转向安全性:在Case 1下, $\omega_1=1.0, \omega_2=0$;在Case 2下, $\omega_1=0.6, \omega_2=0.4$;在Case 3下, $\omega_1=0.4, \omega_2=0.6$;在Case 4下, $\omega_1=0.1, \omega_2=0.9$ 。

1) 能量优化结果对比。

本文方法与文献[7]方法在不同权重组合下的优化结果对比如图5所示,图中风电出力为其绝对值。由图可知:负荷需求较高时(08:00—16:00),相较于文献[7]方法,不同权重组合下本文方法的风电消纳、ESS功率均有所增加,DG利用率有所提高,ESS调节作用更为显著;负荷需求较低时(18:00之后),相较于文献[7]方法,本文方法的风电消纳、ESS功率均有所减少,在节约运行成本的同时,降低了系统整体功率水平,提高了安全裕度(安全距离);在整个优化周期内,本文方法的总负荷曲线与文献

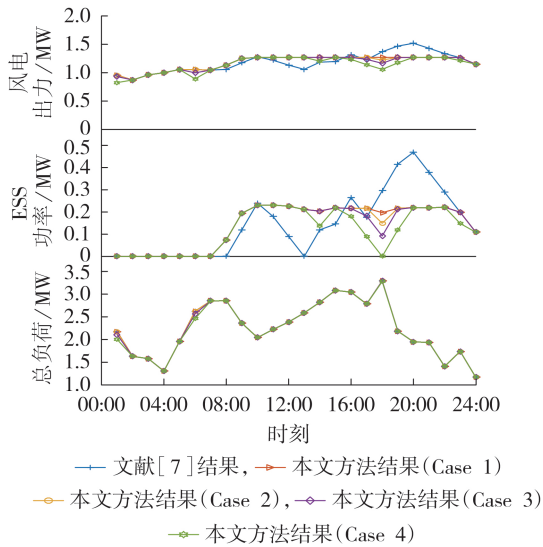


图5 能量优化结果对比

Fig.5 Comparison of energy optimization results

[7]方法的总负荷曲线几乎重合,但由于可调负荷的作用,Case 2—4下本文方法的总负荷比文献[7]方法的总负荷略有降低,2种方法的总负荷与平均馈线距离如表2所示,表中馈线距离总提升量由平均馈线距离增加量与总时段数的乘积粗略计算。

表2 总负荷与平均馈线距离的对比

Table 2 Comparison of total load and average feeder distance

方法	场景	总负荷 / MW	负荷减少量 / MW	平均馈线距离 / MW	馈线距离总提升量 / MW
文献[7]方法		53.988	—	0.1098	—
本文方法	Case 1	53.988	0	0.1137	0.0936
	Case 2	53.978	0.0093	0.1156	0.1392
	Case 3	53.864	0.1239	0.1179	0.1944
	Case 4	53.637	0.3504	0.1264	0.3984

由表2可知,与文献[7]方法相比,不同权重(除Case 1外)下本文方法的总负荷略有降低,平均馈线距离均有所增加,且馈线距离总提升量均大于总负荷降低量,这表明在可调负荷允许调节范围内,本文方法明显提高了系统的安全性。

2) 经济性与安全性对比。

本文方法与文献[7]方法的经济效益、安全裕度对比结果如表3所示,表中文献[7]方法的安全裕度由式(20)得到。

由表3可知:相较于文献[7]方法,在Case 1下,本文方法的经济效益仅降低约0.03%,而安全裕度提高近1倍;相较于文献[7]方法,在Case 2—4下,随着优化权重逐渐向安全性偏移,本文方法的经济效益降低(<7%),安全裕度提升(>72%)。

总之,相较于现有方法,安全域方法能量化系统安全裕度,实现微电网经济效益与安全裕度的综合

表3 经济效益与安全裕度的对比

Table 3 Comparison of economic benefit and security margin

方法	场景	经济效益 / 元	安全裕度 / MW
文献[7]方法		7670.0	0.135
本文方法	Case 1	7668.5	0.233
	Case 2	7659.6	0.281
	Case 3	7560.7	0.339
	Case 4	7134.8	0.448

优化。由于安全域方法可通过权重调整所得方案的安全裕度,因此应对工作点波动、保证安全性的能力更强。

4.3.3 权重对结果的影响

下面进一步说明本文方法在处理系统安全经济运行问题时的灵活性。选取0~1.0范围内以步长0.1变化的所有权重组合,所得优化结果如表4所示。

表4 考虑不同权重的能量优化结果

Table 4 Energy optimization results considering different weights

ω_1	ω_2	经济效益 / 元	安全裕度 / MW	弃风量 / MW	能量渗透率 / %
1.0	0	7668.5	0.233	1.033	53.44
0.9	0.1	7667.6	0.272	1.037	53.36
0.8	0.2	7667.6	0.272	1.037	53.36
0.7	0.3	7667.6	0.272	1.037	53.36
0.6	0.4	7659.6	0.281	1.038	53.35
0.5	0.5	7619.3	0.317	1.046	53.20
0.4	0.6	7560.7	0.339	1.056	53.01
0.3	0.7	7198.5	0.431	1.115	51.90
0.2	0.8	7134.8	0.448	1.122	51.77
0.1	0.9	7134.8	0.448	1.122	51.77
0	1.0	7134.8	0.448	1.122	51.77

根据表4绘制安全性权重 ω_2 变化下经济效益、安全裕度、弃风量及能量渗透率的曲线,如附录D图D6所示。结合表4和图D6可知:随着安全性权重 ω_2 的增大,经济效益呈减小趋势,安全裕度呈提高趋势;随着安全性权重 ω_2 的增大,弃风量呈增加趋势,能量渗透率呈降低趋势;安全性权重 ω_2 从0增大到1.0,弃风量增加0.089 MW,能量渗透率降低1.67%,可见,DG出力的不确定性对系统安全性有不利影响。

5 结论

本文提出一种基于安全域的并网型微电网能量优化新方法,该方法量化了微电网运行状态的安全裕度,实现了微电网经济效益与安全裕度的综合优化。主要结论如下。

1) 本文提出N-0安全与N-1安全下的并网型微电网安全域的定义和模型,考虑微电网与配电网、微电网与其他微电网的联络,计及故障后独立的子微电网安全。

2)本文提出综合安全裕度和经济效益的微电网能量优化模型及求解方法,以最小馈线安全距离量化系统安全裕度。

3)本文模型对DG消纳也有显著影响。当权重偏重安全性时,消纳减少;当权重偏重经济性时,消纳增加。

本文关注的是安全域理论在微电网中的应用,笔者下一步将考虑孤岛运行,研究配电网与微电网安全域的耦合,对离网型微电网、综合能源微电网安全域开展研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 彭寒梅,曹一家,黄小庆.对等控制孤岛微电网的静态安全风险评估[J].中国电机工程学报,2016,36(18):4837-4846, 5107.
PENG Hanmei, CAO Yijia, HUANG Xiaoqing. Static security risk assessment of islanded microgrids under peer-peer control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4837-4846, 5107.
- [3] KARGARIAN A, RAHMANI M. Multi-microgrid energy systems operation incorporating distribution-interline power flow controller[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 129: 208-216.
- [4] SAEED T, FARROKH A, MAHDI D. Microgrid dynamic security: challenges, solutions and key considerations[J]. The Electricity Journal, 2017, 30(4): 43-51.
- [5] 陈卫东,梁朔,肖园园,等.基于模糊最小二乘支持向量机的微电网群状态评估方法[J].电力系统自动化,2019,43(2): 76-82.
CHEN Weidong, LIANG Shuo, XIAO Yuanyuan, et al. Evaluation method for microgrid cluster state based on fuzzy least squares support vector machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 76-82.
- [6] CHALIL MADATHIL S, YAMANGIL E, NAGARAJAN H, et al. Resilient off-grid microgrids: capacity planning and $N-1$ security[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6511-6521.
- [7] 赵志宇,汪可友,李国杰,等.含有电力弹簧的微电网能量优化模型[J].电力自动化设备,2019,39(10):24-31.
ZHAO Zhiyu, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Energy optimization model for microgrid with electric spring[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 24-31.
- [8] 杨毅,雷霞,叶涛,等.考虑安全性与可靠性的微电网电能优化调度[J].中国电机工程学报,2014,34(19):3080-3088.
YANG Yi, LEI Xia, YE Tao, et al. Microgrid energy optimal dispatch considering the security and reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3080-3088.
- [9] 余贻鑫.安全域的方法学及实用性结果[J].天津大学学报,2003,36(5):525-528.
YU Yixin. Methodology of security region and practical results[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(5): 525-528.
- [10] 郭丽云,王良缘,江岳文.考虑经济性与传输安全裕度的微电网最佳接纳水平[J].福州大学学报(自然科学版),2019,47(3):352-358.
GUO Liyun, WANG Liangyuan, JIANG Yuewen. Wind power accommodation level of microgrid considering the economy and transmission security margin[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2019, 47(3): 352-358.
- [11] 彭巧,王秀丽,邵成成,等.计及信息间隙决策理论的含电动汽车充电负荷的微电网多目标规划[J].电力自动化设备,2021,41(1):128-134, 158.
PENG Qiao, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Multi-objective planning of microgrid with electric vehicle charging load based on information gap decision theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 128-134, 158.
- [12] 肖峻,秋泽楷,李航,等.基于安全边界几何观测的配电网改造规划实用方法[J].电力自动化设备,2021,41(8):1-7.
XIAO Jun, QIU Zekai, LI Hang, et al. Practical method of reconstruction planning in distribution network based on geometrical observation of security boundary[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 1-7.
- [13] 肖峻,祖国强,周欢,等.有源配电网的全象限安全域[J].电力系统自动化,2017,41(21):79-85.
XIAO Jun, ZU Guoqiang, ZHOU Huan, et al. Total-quadrant security region for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 79-85.
- [14] SONG C H, XIAO J, ZU G Q, et al. Security region of natural gas pipeline network system: concept, method and application[J]. Energy, 2021, 217: 119283.
- [15] 刘柳,王丹,贾宏杰,等.面向区域综合能源系统的安全域模型[J].电力自动化设备,2019,39(8):63-71.
LIU Liu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Security region model for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 63-71.
- [16] 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.
- [17] 杨金路.基于安全运行边界的微电网故障影响度评估研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.
YANG Jinlu. Fault impact assessment for micro-grid based on safe operation boundary[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [18] 马千里,魏韩,毛航银,等.分布式电源接入的微电网小干扰鲁棒稳定判据与参数安全域自适应覆盖算法[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):385-394.
MA Qianli, WEI Wei, MAO Hangyin, et al. A robust small-signal stability criterion for microgrid with distributed energy and an adaptive cover algorithm for the parametric security region[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(5): 385-394.
- [19] 戈阳阳,周正道,王琪玮,等.微电网网/孤岛转换安全域分析[J].可再生能源,2019,37(4):552-557.
GE Yangyang, ZHOU Zhengdao, WANG Qiwei, et al. Security region analysis of micro-grid connection/island conversion[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(4): 552-557.
- [20] YUEN C, OUDALOV A, TIMBUS A. The provision of frequency control reserves from multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 173-183.
- [21] 肖峻,鲍震宇,宋晨辉,等.基于容量边界与电压边界的潮流模型选择方法[J].电力系统自动化,2021,45(20):76-83.
XIAO Jun, BAO Zhenyu, SONG Chenhui, et al. Selection me-

thod of power flow models based on capacity boundary and voltage boundary[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20):76-83.

- [22] 肖峻,甄国栋,王博,等. 配电网的安全距离:定义与方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10):2840-2851.
XIAO Jun, ZHEN Guodong, WANG Bo, et al. Security distance of distribution network: definition and method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10):2840-2851.
- [23] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1980: 161-176.
- [24] 余贻鑫,秦超. 基于安全域的安全约束机组组合[J]. 中国科学:技术科学, 2013, 43(12):1346-1358.

作者简介:



肖峻

肖峻(1971—),男,教授,博士,主要研究方向为配电系统规划与运行(E-mail: xiaojun@tju.edu.cn);

李瑾一(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为微电网系统的安全分析与规划(E-mail: lijinyi@tju.edu.cn);

宋晨辉(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为综合能源系统的安全分析与规划(E-mail: songchenhui66399@163.com)。

(编辑 王锦秀)

New method of energy optimization for grid-connected microgrid based on security region

XIAO Jun¹, LI Jinyi¹, SONG Chenhui²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: A new method of energy optimization is proposed for grid-connected microgrid based on security region. The definition and model of grid-connected microgrid security region are proposed, and microgrid security regions of $N-0$ security and $N-1$ security are described. Considering the security and economy of microgrid, an energy optimization model of microgrid is established based on security region, which takes the economic benefit and feeder security distance as its optimization objectives, and YALMIP toolbox and CPLEX solver are adopted to solve the model in the planned range of security region. An example is used to show the security region and verify the effectiveness of the energy optimization model. Compared with the existing method, the proposed method can quantify the system security margin, and comprehensively consider the security margin and economic benefit.

Key words: grid-connected microgrid; security region; energy optimization; economic efficiency; security distance

(上接第52页 continued from page 52)

Matching strategy between electric vehicles and fast charging piles based on improved deferred-acceptance algorithm

LI Hengjie^{1,2}, XIA Yuxuan¹, ZHOU Yun², FENG Donghan², LIU Zeyu², FANG Chen³, FENG Qi¹

(1. School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: Aiming at the differences of electric vehicle (EV) users in selecting charging target sites, a fast matching strategy between EVs and fast charging piles considering charging choice conflict is proposed. An EV charging reservation service framework with digital map interface as the underlying data support is proposed. According to the charging preferences, the users are divided into distance-sensitive users, time-sensitive users and price-sensitive users, and the fast charging matching model considering different charging preferences is established. Referring to the deferred-acceptance algorithm of one-to-one matching in the "marriage market", a matching strategy between EVs and fast charging piles based on the improved deferred-acceptance algorithm is proposed to solve the many-to-one matching problem in the charging service market through the multi-round calculation. Taking a test area in Shanghai as an example, the effectiveness, applicability and stability of the proposed strategy are verified. The example results show that the proposed strategy can improve the profitability of charging stations through reasonable allocation of service resources while considering the capacity utilization equilibrium of charging stations.

Key words: electric vehicles; fast charging piles; deferred-acceptance algorithm; charging guidance; stable matching

附录 A 公式及相关推导补充

1) 馈线安全距离公式推导过程。

根据所得微电网边界，当存在 r 个安全边界时，右侧等式可等效为超平面方程形式。

$$R_k - (P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots) = 0 \quad k \leq r \quad (A1)$$

式中： R_k 为等效后的第 k 个等式中非自变量的常数部分，对于 $N-1$ 安全边界 $R_k \in \{P_m^{\min}, P_m^{\max}, \pm C_{B,i}, (\sum P_{DG,i}^{\max} + \sum P_{ESS,i}^{\max})\}$ ；对于 $N-0$ 安全边界 $R_k \in \{P_m^{\min}, P_m^{\max}, \pm C_{B,i}\}$ 。

因此，对于第 k 个等式，计算工作点延轴向 P_i 到边界 β_{nk} 的距离可以表示为：

$$d_k = R_k - \sum_{j \neq i, P_j \in \beta_{nk}} P_j - P_i \quad (A2)$$

馈线安全距离即为工作点延轴向 P_i 到所有边界的最短距离，表达式见式(17)。

2) 能量优化模型中经济效益目标的公式补充。

$$\begin{cases} H_1^t = \lambda_{\text{buy}}^t \left(\sum_{i \in L} P_{\text{load},i}^t - \sum_{i \in L_e} \Delta P_{\text{load},i}^t + \sum_{i \in G} P_{\text{DG},i}^t + \sum_{i \in E} P_{\text{ESS},i}^t \right) \\ H_2^t = \lambda_D \sum_{i \in G^a} P_{\text{DG},i}^t \\ H_3^t = \mu_{\text{ES}} \sum_{i \in E} |\eta_{\text{dc}} P_{\text{ESS},i}^t| \\ H_4^t = \lambda_{\text{dg}} \sum_{i \in G^b} |k_g P_{\text{DG0},i}^t - P_{\text{DG},i}^t| \\ H_5^t = \mu_{\text{es}} \sum_{i \in L_e} |P_{\text{load},i}^t - P_{\text{load0},i}^t| \\ H_6^t = k_{\text{es}} \sum_{i \in L_e} |P_{\text{load},i}^t - P_{\text{load0},i}^t| \end{cases} \quad (A3)$$

式中： G^a 为可控 DG 节点集合； G^b 为不可控 DG 节点集合。 $P_{\text{DG0},i}^t$ 、 $P_{\text{load0},i}^t$ 分别为 DG、负荷日前预测发用电量。 λ_{buy}^t 为微电网向市场购电价格； λ_D 为可控 DG 发电单价； μ_{ES} 为 ESS 充放电运行与维护成本单价； η_{dc} 为 ESS 充放电效率； λ_{dg} 为弃风惩罚因子； k_g 为风电出力预测精度； μ_{es} 为可调节负荷单位调节补贴价格； k_{es} 为可调节负荷投资、运行与维护成本。

3) 能量优化模型中约束条件的公式补充。

(1) 可调节负荷调节范围。

$$-p_{\text{down}} P_{\text{load},i}^{\max} \leq P_{\text{load},i}^t - P_{\text{load0},i}^t \leq p_{\text{up}} P_{\text{load},i}^{\max} \quad (A4)$$

式中： p_{up} 、 p_{down} 分别为可调节负荷调节上下限百分比。

(2) ESS 荷电状态。

$$S_{\text{oc},t} = S_{\text{oc},t-1} - \left(\frac{\eta_{\text{dc}} P_{\text{ESS},i}^{\text{d},t} \Delta t}{E_{\text{dc}}} + \frac{P_{\text{ESS},i}^{\text{c},t} \Delta t}{E_{\text{dc}} \eta_{\text{dc}}} \right) \quad (A5)$$

$$|S_{\text{oc},t} - S_{\text{oc},0}| \leq \phi \quad (A6)$$

式中： $S_{\text{oc},t}$ 、 $S_{\text{oc},0}$ 分别表示 ESS t 时刻与初始时刻下的荷电状态(默认 $S_{\text{oc},0}=50\%$)，单日荷电状态变化量不应超过 ESS 总量的一个比值 ϕ 。 E_{dc} 为 ESS 总容量。 $P_{\text{ESS},i}^{\text{d},t}$ 、 $P_{\text{ESS},i}^{\text{c},t}$ 分别为 t 时刻 ESS 放电、充电功率。

(3) 机组爬坡约束。

$$\begin{cases} -P_{\text{load},i}^{\text{down}} \leq P_{\text{load},i}^{t+1} - P_{\text{load},i}^t \leq P_{\text{load},i}^{\text{up}} & i \in L_e \\ -P_{\text{DG},j}^{\text{down}} \leq P_{\text{DG},j}^{t+1} - P_{\text{DG},j}^t \leq P_{\text{DG},j}^{\text{up}} & j \in G \\ -P_{\text{ESS},k}^{\text{down}} \leq (P_{\text{ESS},k}^{\text{c},t+1} - P_{\text{ESS},k}^{\text{c},t}) - (P_{\text{ESS},k}^{\text{d},t+1} - P_{\text{ESS},k}^{\text{d},t}) \leq P_{\text{ESS},k}^{\text{up}} & k \in E \end{cases} \quad (A7)$$

式中： $P_{load,i}^{up}$ 、 $P_{DG,j}^{up}$ 、 $P_{ESS,k}^{up}$ 分别为可调负荷、DG、ESS 向上爬坡功率限制， $P_{load,i}^{down}$ 、 $P_{DG,j}^{down}$ 、 $P_{ESS,k}^{down}$ 分别为可调负荷、DG、ESS 向下爬坡功率限制。

附录 B 算例安全域计算相关数据补充

表 B1 节点参数
Table B1 Node parameters

节点编号	节点类型	功率范围/MW
1	负荷	[0, 2]
2	DG	[-2.5, 0]
3	负荷	[0, 2]
4	ESS	[-1, 1]
5	负荷	[0, 2]
6	DG	[-1.5, 0]

表 B2 线路参数
Table B2 Line parameters

线路类型	线路容量/MW
并网联络线	3
微电网间联络线	2
普通馈线段	2

表 B3 N-1 安全域的完整表达式
Table B3 N-1 security region complete expression

故障类型	故障元件	安全域表达式
N-0	$\emptyset$	$ P_1+P_2 \leq 2$
		$ P_3+P_4 \leq 2$
		$ P_1+P_2+P_3+P_4 \leq 3$
f_1	L_{B1}	$ P_1+P_2 \leq 2$
		$ P_1+P_2+P_3 \leq 2$
		$ P_1+P_2+P_3+P_4 \leq 2$
f_1	L_{B3}	$ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5 \leq 2$
		$ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6 \leq 3$
		$ P_3+P_4 \leq 2$
f_1	L_{B4}	$ P_3+P_4+P_5 \leq 2$
		$ P_3+P_4+P_5+P_6 \leq 3$
		$ P_1+P_2+P_3 \leq 3$
f_1	L_{B5}	$ P_4+P_5 \leq 2$
		$ P_4+P_5+P_6 \leq 3$
		$ P_3+P_4+P_5 \leq 2$
f_1	L_{B6}	$ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5 \leq 3$
		$ P_5+P_6 \leq 2$
		$ P_4+P_5+P_6 \leq 2$
f_2	DG_1	$ P_3+P_4+P_5+P_6 \leq 2$
		$ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6 \leq 3$
		$ P_1+P_3+P_4 \leq 3$
f_3	L_{B2}	$P_5\leq 3$
		$P_1\leq 2$
		$ P_3+P_4 \leq 2$

注：L_{B1}—L_{B6} 分别指 B₁—B₆ 所在线路故障。

表 B4 N-1 安全边界的完整表达式
Table B4 N-1 security boundary complete expression

故障类型	故障元件	安全域表达式
$N-0$	$\emptyset$	$ P_1+P_2 =2$ $ P_3+P_4 =2$ $ P_1+P_2+P_3+P_4 =3$
f_1	L_{B1}	$ P_1+P_2 =2$ $ P_1+P_2+P_3 =2$ $ P_1+P_2+P_3+P_4 =2$ $ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5 =2$ $ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6 =3$
f_1	L_{B3}	$ P_3+P_4 =2$ $ P_3+P_4+P_5 =2$ $ P_3+P_4+P_5+P_6 =3$
f_1	L_{B4}	$ P_1+P_2+P_3 =3$ $ P_4+P_5 =2$ $ P_4+P_5+P_6 =3$
f_1	L_{B5}	$ P_4+P_5 =2$ $ P_3+P_4+P_5 =2$ $ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5 =3$
f_1	L_{B6}	$ P_5+P_6 =2$ $ P_4+P_5+P_6 =2$ $ P_3+P_4+P_5+P_6 =2$ $ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6 =3$
f_2	DG_1	$ P_1+P_3+P_4 =3$
f_2	DG_2	$P_5=3$
f_3	L_{B2}	$P_1=2$ $ P_3+P_4 =2$

附录 C 安全域结果与交流潮流的对比分析

本文安全域模型选用直流潮流模型，将本文结果与采用交流潮流的 $N-1$ 安全域观测结果对比，计算两者误差。采用本文图 1 的算例，线路采用 LGJ-185 类型，其电阻为 $0.17\ \Omega/\text{km}$ ，电抗为 $0.402\ \Omega/\text{km}$ ，长度均设为 $2\ \text{km}$ ，元件参数设置见表 C1。计算系统潮流时，基准电压设为 $0.4\ \text{kV}$ ，负荷功率因数设为 0.95 。

表 C1 微电网系统节点类型及参数

Table C1 Node types and parameters of a microgrid system

节点编号	节点类型	功率范围/MW
1	负荷	[0, 2.5]
2	DG	[-1.5, 0]
3	DG	[-1, 0]
4	负荷	[0, 2.5]
5	负荷	[0, 2.5]
6	DG	[-1.5, 0]

首先根据本文模型进行安全域计算。其次，在原线路容量约束基础上补充电压约束，即节点电压偏差不超过 $\pm 7\%$ 。采用图 C1 所示高斯-赛德尔潮流算法与逐点仿真法，进行交流潮流下的的安全域二维观测。最后，将两种潮流模型的安全域二维视图绘制于同一坐标系中进行对比，并根据文献[21]方法计算安全域误差，结果对比见表 C2。

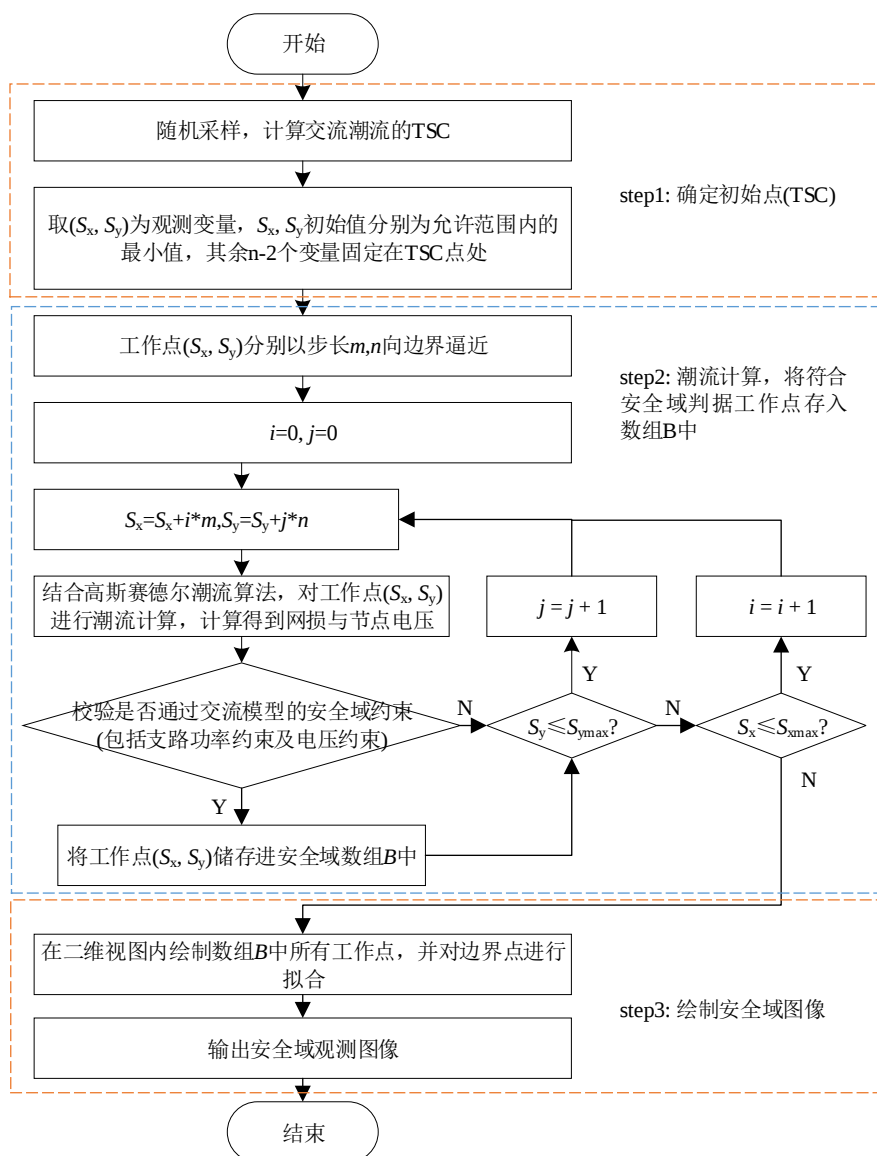
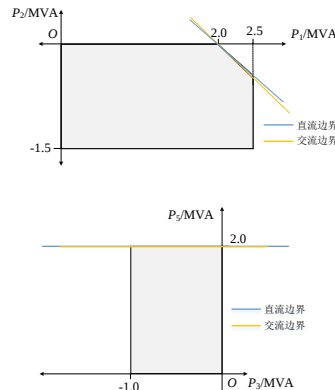
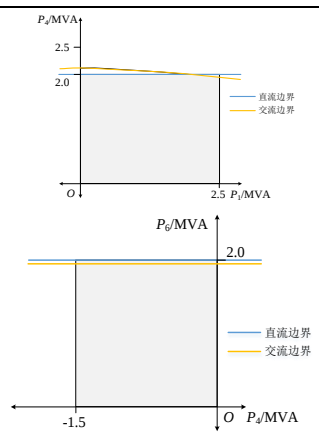


图 C1 计及交流潮流的安全域观测方法

Fig.C1 Observation process of security region with AC power flow model

表 C2 本文结果与交流潮流结果对比

Table C2 Comparison of security regions from model in this paper with results from AC model

安全域二维视图	误差/%	安全域二维视图	误差/%
	0.38 0		2.49 4.04

从表 C2 看出，与计及交流潮流所得结果相比，本文所得安全域的直流边界与交流边界几乎重合。本文边界并非严格位于交流边界以内，存在较小误差，最大误差不超过 4.04%。

从安全域刻画的完整程度来看，图 C1 所示交流潮流观测方法不能完整刻画全部安全域，也得不到解析式。而本文得到了安全域解析表达式，能完整地刻画安全域。

附录 D 算例能量优化的相关数据补充

1) 能量优化算例仿真输入参数。

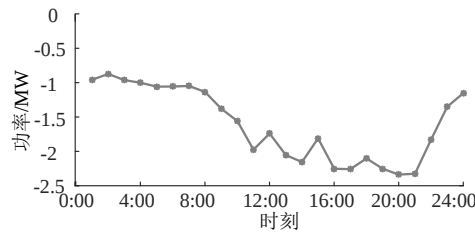


图 D1 风电出力预测曲线

Fig.D1 Forecasting curve of wind power output

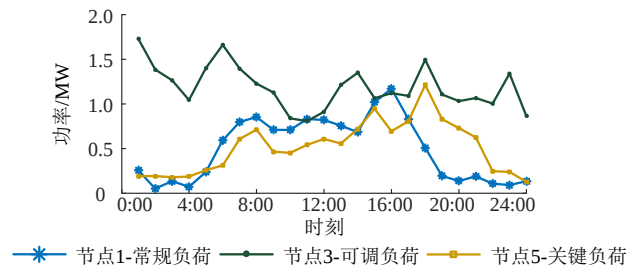


图 D2 优化前各类负荷需求曲线

Fig.D2 Various load demand curves before optimization

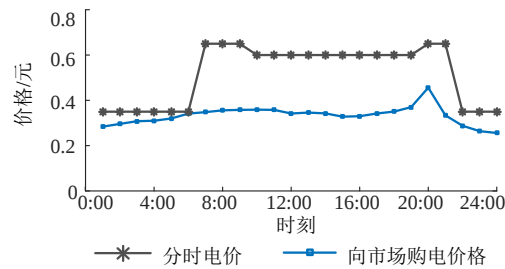


图 D3 市场购电价格与分时电价

Fig.D3 Market electricity purchase price and time-of-use electricity price

表 D1 能量优化仿真相关参数

Table D1 Relevant simulation parameters of energy optimization

参数类型	设定值	参数类型	设定值	参数类型	设定值
λ_{dg}	0.8	$\Delta\alpha$	0.02	λ_d	0.52
η_{DC}	0.95	k_s	1.05	E_{dc}	1.03×10^3
η_{dc}	0.92	μ_{es}	1.5391	μ_{ES}	2.4606
p_{up}	5%	$P_{DG,j}^{up}$	0.3	$P_{load,i}^{up}$	0.2
p_{down}	10%	$P_{DG,j}^{down}$	0.45	$P_{load,i}^{down}$	0.2
$P_{ESS,k}^{up}$	0.09	$P_{ESS,k}^{down}$	0.12	ϕ	0.45

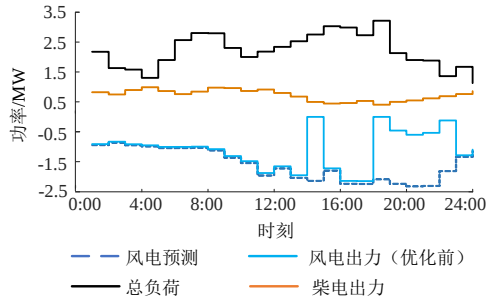


图 D4 优化前微电网 DG 出力与日负荷曲线

Fig.D4 DG output and daily load curve of microgrid before optimization

2) AHP 计算权重过程。

采用 AHP 计算多目标函数的权重系数。具体过程如下：

1. 建立层次分析结构——根据多目标函数的构成，准则层包括经济效益与安全裕度两部分。

2. 构建判断矩阵——判断矩阵由元素 a_{ij} 构成，表示准则层所有因素针对目标层的相对重要性的比较，元素 a_{ij} 由 1—9 标度法给出，见表 D2。

表 D2 1—9 标度表

Table D2 1—9 scalar system

标度	含义
1	两个因素相比，具有同等重要性
3	两个因素相比，一个比另一个稍微重要
5	两个因素相比，一个比另一个明显重要
7	两个因素相比，一个比另一个强烈重要
9	两个因素相比，一个比另一个极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素 i 与 j 的判断 a_{ij} ，因此因素 j 与 i 的判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$ 。

3. 判断矩阵的一致性检验：一致性指标 $CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$ ，随机一致指标 $RI=\frac{\sum_{i=1}^n CI_i}{n}$ ，一致性比率： $CR=\frac{CI}{RI}$ 。当 $CR<0.10$ 时，说明判断矩阵具有满意的一致性，可进行归一化处理。

4. 权重计算与排序——计算判断矩阵每一行的元素乘积 $M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (i=1, \dots, n)$ ，计算 M_i 的 n 次方根 $\bar{w}_i = \sqrt[n]{M_i}$ ，最后归一化处理 $w_i = \bar{w}_i / \sum_{i=1}^n \bar{w}_i$ 。

5. 根据本文算例可得判断矩阵 $A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} \\ a_{21} & 1 \end{bmatrix}$ ， a_{12} 为经济效益与安全裕度重要性比较结果。不同场景中专家评估的标度值可能不同，将产生不同的权重计算结果，见表 D3。

表 D3 不同标度下的权重计算结果

Table D3 Calculation results of weights under different scales

标度	一致性检验	ω_1	ω_2
1/9	$\lambda_{\max}=2, CI=0, CR=0$	0.1	0.9
1/7		0.125	0.875
1/5		0.17	0.83
1/2		0.33	0.67
1		0.5	0.5
2		0.67	0.33
5		0.83	0.17
7		0.875	0.125

注：标度 1/9、…、9 分别表示经济效益与安全裕度重要性比较结果为绝对不重要、非常不重要、比较不重要、稍微不重要、同样重要、稍微重要、比较重要、非常重要、绝对重要。

3) 能量优化算例仿真结果补充。

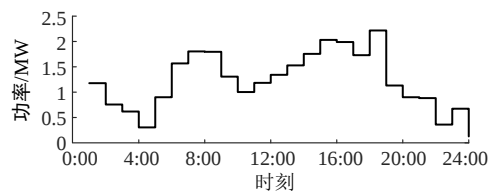
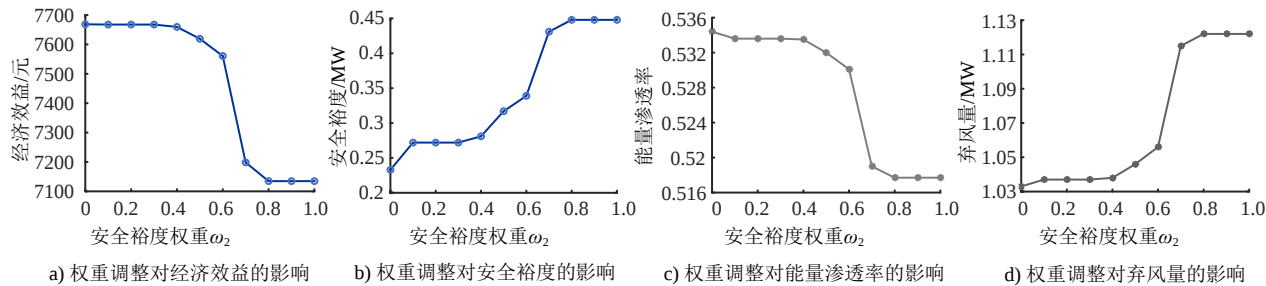


图 D5 微电网的 PCC 交换功率

Fig.D5 Exchange power of PCC for microgrids



a) 权重调整对经济效益的影响

b) 权重调整对安全裕度的影响

c) 权重调整对能量渗透率的影响

d) 权重调整对弃风量的影响

图 D6 权重改变对优化结果的影响对比

Fig.D6 Comparison of impact of weight changes on optimization results

附录 E 变量含义

表 E1 变量含义

Table E1 Meaning of variables

变量	含义	变量	含义	变量	含义
W	工作点	d_j	工作点延轴向 P_i 到平面 j 的距离	$P_{DG0,i}^t$	DG 日前预测发用电
N	微电网节点数目	D_i	馈线安全距离	$P_{load0,i}^t$	负荷日前预测发用电
N_d	节点集合	D^a	平均馈线距离	λ_{buy}^t	微电网向市场购电价格
L	负荷节点集合	D^m	最小馈线距离	λ_D	可控 DG 发电单价
G	DG 节点集合	d_r^i	馈线安全距离具体数值	μ_{ES}	ESS 充放电运行与维护成本 单价
E	ESS 节点集合	C	微电网净利润值	η_{dc}	ESS 充放电效率
I	下级子微电网节点集合	C_1	常规电费收益	λ_{dg}	弃风惩罚因子
Θ	状态空间	C_2	对关键负荷高可靠供电的额外保障 收益	k_g	风电出力预测精度
$P_{load,i}^{max}$	负荷功率上限	C_3	全天的运营成本	μ_{es}	可调节负荷单位调节补贴价 格
$P_{DG,i}^{max}$	DG 功率上限	T	优化周期时段数	k_{es}	可调负荷投资、运行与维护 成本
$P_{ESS,i}^{dmax}$	ESS 放电功率上限	Δt	各时段时长	$p_{up}、p_{down}$	可调负荷调节上下限百分比
$P_{ESS,i}^{cmax}$	ESS 充电功率上限	λ_{sell}^t	售电价格	$S_{oc,t}$	ESS t 时刻下的荷电状态
$P_{pcc,i}^{dmax}$	互联微电网节点注入节点功率 上限	L_e	可调负荷节点集合	$S_{oc,0}$	ESS 初始时刻下的荷电状态
$P_{pcc,i}^{cmax}$	互联微电网节点流出节点功率 上限	$\Delta P_{load,i}^t$	接受调节的负荷减少量	E_{dc}	ESS 总容量
M	微电网并网联络线集合	$\Delta\alpha$	关键负荷额外保障费用	$P_{load,i}^{up}$	可调负荷向上爬坡功率限制
P_m^{pcc}	微电网与配电网之间的交换功率	L_k	关键负荷节点集合	$P_{load,i}^{down}$	DG 向上爬坡功率限制
P_m^{pmax}	并网联络线传输功率上限	H_1^t	微电网向市场购电成本	$P_{DG,j}^{up}$	ESS 向上爬坡功率限制
P_m^{pmin}	并网联络线传输功率下限	H_2^t	可控 DG 运行成本	$P_{DG,j}^{down}$	可调负荷向下爬坡功率限制
Ω_{GMSR}	$N-1$ 安全域	H_3^t	ESS 充放电成本	$P_{ESS,k}^{up}$	DG 向下爬坡功率限制
Ω_{GMSR0}	$N-0$ 安全域	H_4^t	弃风成本	$P_{ESS,k}^{down}$	ESS 向下爬坡功率限制
β_{N-1}	$N-1$ 安全边界	H_5^t	可调负荷调控补贴		
β_{N-0}	$N-0$ 安全边界	H_6^t	可调负荷运行维护成本		
Ψ	故障集	ω_1	经济效益权重系数		
ψ_k	故障元件 k	ω_2	安全裕度权重系数		
B	线路集合	C_{max}	经济效益单一目标下的最大寻优解		
$P_{B,i}$	线路 B_i 功率	C_{min}	经济效益单一目标下的最小寻优解		
$A_{B,i}$	线路 B_i 下游节点集合	δ_{max}	安全裕度单一目标下的最大寻优解		
$C_{B,i}$	线路 B_i 容量	δ_{min}	安全裕度单一目标下的最小寻优解		
A_{ns}	因故障 f_3 出现的独立子微电网节 点集合	F	综合优化目标		
β_{N-1}	$N-1$ 安全边界	P_{wc}	弃风量		