

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241352

计及柔性负荷资源的分布式智能电网安全域建模

史训涛^{1,2}, 孙健², 肖小兵², 柯清派², 邱杨鑫², 阳浩³, 谭颖¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663;
3. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要: 随着新能源(renewable energy resource, RES)和柔性负荷(flexible load, FL)资源渗透率的不断提高, 其在参与中低压配电网安全性调控方面的潜力日益凸显。因此, 考虑新能源出力极端态和柔性负荷的影响, 提出了计及 RES 和 FL 的分布式智能电网安全域(distributed smart grid security region, DSG-SR)计算模型。首先, 分析 RES 和 FL 的运行特点并给出相应的数学表达式, 讨论了系统的正常运行约束与 $N-1$ 安全性。其次, 将 RES 和 FL 运行模式作为状态变量, 并考虑新能源极端态出力场景及 FL 的响应成本约束, 建立 DSG-SR 模型。最后, 以二维截面图的形式展现 DSG-SR 的应用, 揭示 RES 和 FL 对 DSG-SR 的作用机理。所提模型可作为分布式智能电网安全分析的实用工具, 为含高比例新能源与柔性负荷的台区级分布式智能电网安全稳定运行以及电力市场机制设计提供关键的技术支撑。

关键词: 分布式智能电网; 安全域; 新能源; 极端态; 柔性负荷

Modeling of distributed smart grid security region considering flexible load resources

SHI Xuntao^{1,2}, SUN Jian², XIAO Xiaobing², KE Qingpai², QIU Yangxin², YANG Hao³, TAN Ying¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China)

Abstract: With the increasing penetration of renewable energy resources (RES) and flexible loads (FL), their potential in enhancing the security regulation of MV/LV distribution systems has become increasingly evident. Considering the impacts of extreme renewable energy output conditions and flexible load behaviors, this paper proposes a distributed smart grid security region (DSG-SR) model that incorporates RES and FL. First, the operational characteristics of RES and FL are analyzed, and their corresponding mathematical equations are established, followed by discussions on constraints related to normal operation and $N-1$ security. Next, treating the operational modes of RES and FL as state variables, a DSG-SR model is established considering the extreme output scenarios of RESs and the FL response cost constraints. Finally, the application of the DSG-SR model is illustrated through two-dimensional cross-sectional plots, revealing the mechanism by which RES and FL influence the DSG-SR. The proposed model can serve as a practical tool for security analysis in distributed smart grids, providing key technical support for secure and stable operation and for the design of market mechanisms in distribution systems with high shares of RES and FL.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52177085).

Key words: distributed smart grid; security region; renewable energy; extreme condition; flexible load

0 引言

随着大量新能源(renewable energy sources, RES)^[1]和柔性负荷(flexible load, FL)资源^[2-3]的接入,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52177085); 南方电网公司科技项目资助(ZBKJXM20232458, ZBKJXM20232460)

中低压配电网正逐步发展为分布式智能电网, 可根据负荷波动、间歇性分布式电源(distributed generator, DG)出力及需求响应等变化, 动态选择兼顾经济性与可靠性的运行模式^[4]。在配电网智能化进程中, 不仅伴随高度的信息化和自动化, 还将引入 RES、FL、储能等分布式元件与新运行模式, 给系统的安全运行带来严峻的挑战。

配电网安全域(distribution system security region, DSSR)是在配电系统安全性准则和运行约束下,刻画配电网运行点的安全运行边界和最大负荷能力的数学描述,是未来分布式智能配电系统的运行范围量化和安全性分析的有力工具。DSSR 定义为配电网所有满足 $N-1$ 安全运行约束的工作点的集合^[5],可理解为一个由安全运行边界构成的超平面。相较于基于单个案例模拟的安全评估方法,“域”能够提供可视化的系统安全运行边界,避免逐个元件的 $N-1$ 仿真验证,为揭示电网的安全特性、观察电网性质和缺陷提供了一种高效的方法。目前 DSSR 研究已形成理论存在性证明^[6]、数学模型建立^[7]、仿真观测方法^[8]、作用机理^[9]和实际应用^[10-11]等较完整的体系,并拓展至交直流混联配电网^[12-13]和综合能源系统^[14-15]等领域,为配电网的优化调度^[16]、配电网优化规划^[17-18]、综合能源系统优化配置^[19]和 DG 容量计算^[20]等问题的解决提供了新的思路。随着围绕配电网的小规模、分散式资源群体大量涌现,面向分散分布式源网荷储资源聚合、多种供电应用服务综合的分布式智能电网应运而生^[21-25]。但是,对于计及 RES、储能及 FL 资源的分布式智能电网研究较少。文献[26]针对有源配电网,提出了全象限配电系统安全域模型,并分析了安全域二维界面的象限及形状特点。文献[9]从传统负荷视角出发,分析了不同运行模式 DG 对 DSSR 的作用机理。文献[7]中对不同 DG 渗透率下 DSSR 的特性进行了观测和分析。文献[8]从安全性视角出发,剖析了储能在配电网中的不同角色,并定义了“安全性服务实践”与“实时安全性服务能力”两个指标,从而实现了储能在安全服务能力的量化评估。这些研究虽然反映了 DG 接入后配电网中双向潮流的特征,但尚未深入分析 RES 出力变化对 DSSR 的影响。

FL 是未来分布式智能电网中重要的负荷侧互动资源。文献[27]研究了需求响应(demand response, DR)分级对系统最大供电能力的影响。文献[28]指出在 $N-1$ 下 DR 会增大 DSSR。这些研究对象主要集中在传统无源配电网,未考虑有源配电网中 FL 响应成本对 DSSR 性质的影响。

RES 和 FL 的引入使得配电系统的安全性问题更加复杂^[29]。一方面,RES 接入使得系统节点潮流由单向变为双向。相较于传统配电网,分布式智能电网安全域(distributed smart grid security region, DSG-SR)由单象限域向全象限域转变,同时 DSG-SR 的二维截面呈现出新的几何特征。另一方面,RES 出力具有极大的不确定性,充分考虑极端态出力场景对于进一步发挥 DSG-SR 在实际优化决策方面的作

用有积极影响。

在上述研究的基础上,本文提出了计及 RES 极端态和 FL 的 DSG-SR 模型。结合不同运行模式 DG 的数学模型,利用基于置信区间的模糊集构造方法对 RES 极端态进行建模。此外,将 FL 响应成本约束引入 DSG-SR 模型中,为 RES 高渗透接入、FL 参与互动的分布式智能电网安全供电提供了理论依据。

1 研究场景和模型假设

1.1 研究场景

本文以包含新能源与柔性负荷的分布式智能电网为研究对象。一方面,由于高比例 DG 的接入和馈线的普遍联络,分布式智能电网的相关安全运行问题更为复杂,需要研究安全评估方法为后续规划设计提供理论支撑。另一方面,先进二次设备的应用使配电网普遍实现配电自动化,这为安全域分析方法的应用奠定了基础。

1.2 模型假设

1) 采用直流潮流模型计算。本文研究的分布式智能电网具有充足的无功补偿设备,且电网和 DG 具有足够调节能力,因此认为配电系统节点电压波动可忽略不计,模型不考虑电压约束。另外,已有研究表明不计及电压约束和网损的直流潮流模型得到的 DSSR 计算误差较小^[30]。通常认为城市配电网馈线较短,因此本文采用的直流潮流简化模型可满足系统安全分析的精度需求。

2) 节点功率方向设定。设节点功率从电网侧流出方向为正,向电网侧注入方向为负;支路潮流从变电站流向馈线末端为正。

3) RES 出力极端态选取。在分布式智能电网中 RES 渗透率较高,其出力水平波动对系统安全性有较大影响。因此, $N-1$ 故障集中考虑 RES 极端态出力场景。

4) 考虑 FL 的动作只发生在系统 $N-1$ 故障后。

5) 研究系统 $N-1$ 故障后的某个时间断面,不考虑 FL 功率突变对系统安全性的影响。

2 计及新能源和 FL 的系统安全性

DSG-SR 模型涉及工作点、正常运行 $N-0$ 约束及 $N-1$ 安全约束。

分布式智能电网在确保系统安全稳定运行的前提下,提供 RES 消纳及 FL 供电服务。本文选取系统节点功率作为安全分析的状态量。定义配电网所有节点视在功率构成的状态空间为运行点,表示为

$$W = [S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_m] \quad (1)$$

$$S_i = \begin{cases} S_{L,i}, & i \in L \\ S_{G,i}, & i \in G \end{cases} \quad (2)$$

式中: i 为配电网节点编号, $1 \leq i \leq m$; m 为配电网非平衡节点数; S_i 为节点 i 的净功率; $S_{L,i}$ 和 $S_{G,i}$ 分别为节点 i 上 FL 和 RES 的视在功率代数和; L 为 FL 集合; G 为 RES 集合。设节点功率从配电网侧流出方向为正, 注入为负, 则对 FL 有 $S_{L,i} \geq 0$, 对 RES 有 $S_{G,i} \leq 0$ 。

2.1 状态空间约束

负荷功率不超过配电变压器容量, RES 机组出力不超过其发电容量, 表示为

$$\begin{cases} S_{L,i}^{\min} \leq S_{L,i} \leq S_{L,i}^{\max}, & i \in L \\ -S_{G,i}^{\max} \leq S_{G,i} \leq 0, & i \in G \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S_{L,i}^{\max}$ 、 $S_{L,i}^{\min}$ 分别为负荷 i 的最大和最小视在功率, $S_{L,i}^{\min}$ 默认值为 0; $S_{G,i}^{\max}$ 为 RES 机组 i 的发电容量。

2.2 正常运行状态约束

配电网正常运行时, 系统内线路和主变压器功率不能超过其额定容量 $S_{i,B}$ 的限制, 表示为

$$\begin{cases} |S_{B,i}| = \left| \sum_{j \in \Omega_{B,i}} S_j \right| \leq c_{B,i}, \forall i \in B \\ |S_{T,i}| = \left| \sum_{j \in \Omega_{T,i}} S_j \right| \leq c_{T,i}, \forall i \in T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_{B,i}$ 为支路 i 的功率; $S_{T,i}$ 为主变压器 i 的功率; $\Omega_{B,i}$ 为支路 i 的下游节点集合, “下游” 是指从变电站变压器到其馈线终端的方向; $\Omega_{T,i}$ 为主变压器 i 下游节点的集合; j 表示集合 $\Omega_{B,i}$ 和 $\Omega_{T,i}$ 中的节点索引; $c_{B,i}$ 为线路 i 的容量; $c_{T,i}$ 为主变压器 i 的容量; B 为所有线路的集合; T 为所有变压器的集合。RES 的引入使系统潮流变为双向潮流, 因此式(4)采用绝对值符号。

2.3 $N-1$ 安全约束

如果配电系统是 $N-1$ 安全的, 则意味着在任何单一故障发生后, 非故障区域的 RES 消纳及负荷供电不会中断, 且不会出现线路过载或节点电压越限问题。 $N-1$ 安全准则在一些国家已被广泛应用于配电系统规划和运行中。

定义故障集为分布式智能电网运行过程中可能发生的所有故障的集合。由于配电网中元件数量庞大, 因此本文的安全分析中将故障集简化为馈线故障和主变压器故障两种较严重的故障。若在这两

种故障下配电网仍可安全运行, 则认为其他故障下配电网安全运行不受影响。

记 $N-1$ 故障后系统工作点为 $W(t+1)$, 故障后 RES 出力和 FL 功率分别记为 $S_G(t+1)$ 和 $S_L(t+1)$ 。元件 k 发生 $N-1$ 故障后, 为恢复故障区供电, 配电网将重构形成新的拓扑结构, 元件 k 相关的功率平衡方程也会相应发生变化。

1) $N-1$ 线路容量约束

式(5)表示线路 i 功率不能超过其线路容量约束。

$$S_{B,i}(v) = \left| \sum_{j \in A_{B,i}(v)} [(1-\alpha_j)S_{L,j} + S_{G,j}(t+1)] \right| \leq c_{B,i}, \quad (5)$$

$$\forall i \in B, \psi_v \notin B$$

式中: ψ_v 为元件 v 的故障场景, $\psi_v \notin B$ 表示线路集合 B 不包含元件 v ; $S_{B,i}(v)$ 和 $A_{B,i}(v)$ 分别表示元件 v 发生 $N-1$ 故障后线路 B_i 的功率以及 B_i 下游节点的集合。

2) $N-1$ 主变压器容量约束

式(6)表示变压器 i 的功率不能超过其容量约束。

$$S_{T,i}(v) = \left| \sum_{j \in A_{T,i}(v)} [(1-\alpha_j)S_{L,j} + S_{G,j}(t+1)] \right| \leq c_{T,i}, \quad (6)$$

$$\forall i \in T, \psi_v \notin T$$

式中: $S_{T,i}(v)$ 和 $A_{T,i}(v)$ 分别表示元件 v 发生 $N-1$ 故障后主变压器 T_i 的功率以及 T_i 下游节点的集合; $\psi_v \notin T$ 表示主变压器集合 T 不包含元件 v 。

设故障集为 $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_v, \dots\}$, 若某工作点 W 下, $\forall \psi_v \in \Psi$, 式(5)和式(6)均成立, 则 W 满足 $N-1$ 安全准则。

2.4 $N-1$ 故障后新能源极端态出力约束

1) $N-1$ 故障后新能源运行模式

电力系统中, 从可控性的角度可将 DG 划分为半可控型电源和可控型电源。

对于可控型电源, 在系统发生 $N-1$ 故障时, 存在并网运行、独立运行和脱网 3 种模式。在本文所使用的直流潮流模型中, 可将此类 DG 视为负的负荷。IEEE 1547 标准支持 DG 在系统发生 $N-2$ 甚至大面积故障时通过协调控制等技术手段实现孤岛运行, 本文配电网 DSSR 只考虑单一偶然性, 因此本文模型不考虑故障后 DG 独立运行。

$N-1$ 故障后并网和脱网运行电源对应的数学模型表示为

$$S_G(t+1) = S_{G,\max} \quad (7)$$

$$S_G(t+1) = 0 \quad (8)$$

式中: $S_{G,max}$ 为电源的额定出力。对于并网型 DG, 在系统发生 $N-1$ 故障后仍保持额定出力, 如式(7)所示; 对于脱网型 DG, 在系统发生故障后出力水平则视为 0, 如式(8)所示。

对于半可控型电源, 其输出功率只能单向减少不能增加。为确保配电网发生 $N-1$ 故障后系统的可用容量, 通常采用的策略为保持故障前后电源瞬时出力不变, 则半可控型电源的出力模型为

$$S_G(t+1) = S_G \quad (9)$$

式中: S_G 为系统故障前电源的瞬时出力。

通常风电和光伏等 RES 被视为半可控型电源。

2) RES 极端态运行模式

风电、光伏等 RES 的出力具有较强的不确定性^[31]。为了保证配电网 $N-1$ 故障后的极端态场景可用容量, 需要考虑 RES 极端态下的出力场景。因此, 本文采用基于置信区间的模糊集构造方法(confidence interval-based ambiguity set, CIAS)对 RES 极端态下的出力场景进行建模^[32-33]。

将 RES 出力预测误差记为 ζ , 将随机变量 ζ 按升序排列, 得到预测误差的升序样本集 S , 有 $S = \{\hat{\zeta}^{(1)}, \dots, \hat{\zeta}^{(k)}, \dots, \hat{\zeta}^{(n)}\}$ 。记 ζ 的真实分布 \mathbb{P}^* 的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)为 $F(x)$, 有 $F(\hat{\zeta}^{(k)}) \sim \beta(k, n+1-k)$, $k=1, \dots, n$, 其中 n 为观测样本数量。

对于给定置信水平为 $1-\alpha$, 估计 S 中每个样本的置信区间为

$$\underline{p}_k = B_{k,n}^{\tilde{\alpha}/2} \quad (10)$$

$$\bar{p}_k = B_{k,n}^{1-\tilde{\alpha}/2} \quad (11)$$

式中: \bar{p}_k 、 \underline{p}_k 分别表示对随机样本 k 置信区间的上界和下界的估计; k 为随机样本在 S 中的顺序索引; $B_{k,n}^\alpha$ 表示 $\beta(k, n+1-k)$ 分布的 α -分位数; 对于参数 $\tilde{\alpha}$, 有 $\tilde{\alpha} = \exp\{-c_1(\alpha) - c_2(\alpha)\sqrt{\ln[\ln(n)]} - c_3(\alpha) \cdot [\ln(n)]^{c_4(\alpha)}\}$, 其中 $c_1(\alpha) = -2.75 - 1.04\ln(\alpha)$, $c_2(\alpha) = 4.76 - 1.20\alpha$, $c_3(\alpha) = 1.15 - 2.39\alpha$, $c_4(\alpha) = -3.96 + 1.72\alpha^{0.171}$ 。

将 $\hat{\zeta}^{(0)} = -\infty$, $\hat{\zeta}^{(n+1)} = \infty$ 添加到升序样本集 S 中, 定义 $\underline{p}_0 = 0$, $\bar{p}_{n+1} = 1$, 则

$$\underline{P}(x) = \max\{\underline{p}_k : \hat{\zeta}^{(k)} \leq x\} \quad (12)$$

$$\bar{P}(x) = \min\{\bar{p}_k : \hat{\zeta}^{(k)} \geq x\} \quad (13)$$

式中: $\underline{P}(x)$ 和 $\bar{P}(x)$ 分别为 $F(x)$ 的 $1-\alpha$ 置信带的下界和上界。在工程实践中, 一般取 $\alpha \leq 0.1$, 本文

中设定 α 等于 0.05。

记风险厌恶水平为 β , 对于 RES 的出力场景 S_g , 有 $\forall S_g \in [\underline{S}'_g, \bar{S}'_g]$ 。将极端态下的出力场景建模为

$$\underline{S}'_g = \bar{P}^{-1}(\beta) \quad (14)$$

式中: \underline{S}'_g 和 \bar{S}'_g 分别表示极端态下 RES 出力的下界和上界。

为了保证 RES 极端态出力场景下配电网 $N-1$ 故障后的可用容量, 本文采用的调度策略为使 RES 的出力为其极端态下的出力场景。因此, 故障后 RES 极端态下的出力模型为

$$S_G(t+1) = \underline{S}'_g \quad (15)$$

2.5 $N-1$ 故障后柔性负荷运行约束

考虑 FL 对 DSG-SR 的影响, 在系统发生 $N-1$ 故障后 FL 减少一定比例的功率消耗。本文选取紧急需求响应(emergency demand response, EDR)模型, 系统 $N-1$ 后的 FL 运行约束为

$$S_{L,j}(t+1) = (1-\alpha_j)S_{L,j} \quad (16)$$

$$C_{\text{post-f}} \leq \lambda C_{\text{pre-f}} \quad (17)$$

$$C_{\text{pre-f}} = \rho_j S_{L,j} \quad (18)$$

$$C_{\text{post-f}} = C_R + C_E - B_R \quad (19)$$

$$C_R = k_1 \cdot (\alpha_j S_{L,j})^2 + (1-\theta) \cdot k_2 \cdot (\alpha_j S_{L,j}) \quad (20)$$

$$C_E = \eta \cdot \rho_j \cdot S_{L,j}(t+1) \quad (21)$$

$$B_R = r_j \cdot (\alpha_j S_{L,j}) \quad (22)$$

式中: α_j 为故障后节点 j 柔性负荷调节系数, 表示该节点 FL 允许削减的比例, 有 $0 \leq \alpha_j \leq 1$; $C_{\text{pre-f}}$ 为 $N-1$ 故障前 FL 用电成本; $C_{\text{post-f}}$ 为 $N-1$ 故障后 FL 用电成本; λ 为 FL 响应的成本系数; ρ_j 为故障后节点 j 供电电价; C_R 为 FL 响应成本; C_E 为 FL 用电费用; B_R 为 FL 响应收益; k_1 和 k_2 为两个常系数; θ 为 FL 响应意愿, $\theta \in (0,1)$; η 为 FL 参与响应的电费折扣; r_j 为单位电量的响应补偿价格。

本文的观测变量是由节点 RES 出力、FL 功率共同构成的视在功率值, 当系统发生 $N-1$ 故障时, 模型需计及故障时 $W(t+1)$ 的安全约束, 因此需要故障前后工作点的映射关系描述这两种状态之间的转化关系, 即

$$h : W(t+1) = (E + E\gamma)W \quad (23)$$

式中: E 为单位矩阵; γ 为由 RES 出力模式和 FL 调节系数共同构成的向量。

3 计及新能源和 FL 的 DSG-SR

3.1 数学模型

本文 DSG-SR 的边界由 RES 及 FL 状态空间边界、系统正常运行安全边界以及 $N-1$ 安全边界共同组成。安全域的物理含义是安全域内(包括边界上)所有的运行状态都是安全的。由上述正常运行约束及 $N-1$ 约束, 并考虑 RES 的极端态运行场景, 得到 DSG-SR 的数学模型如式(24)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{\text{TQSR}} = \{W = [S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n] \in \Theta\}, \\ i = 1, 2, \dots, n \\ S_i = \begin{cases} S_{L,i}, & i \in L \\ S_{G,i}, & i \in G \end{cases} \\ \text{s.t.} \\ S_{L,i}^{\min} \leq S_{L,i} \leq S_{L,i}^{\max}, \quad i \in L \\ -S_{G,i}^{\max} \leq S_{G,i} \leq 0, \quad i \in G \\ |S_{B,i}| = \left| \sum_{j \in A_{B,i}} S_j \right| \leq c_{B,i}, \quad \forall i \in B \\ |S_{T,i}| = \left| \sum_{j \in A_{T,i}} S_j \right| \leq c_{T,i}, \quad \forall i \in T \end{array} \right. \quad (24)$$

式中: 智能电网安全域 Ω_{TQSR} 为所有 0 、 $N-0$ 和 $N-1$ 运行点构成的集合; Θ 为运行约束构成的状态空间。

对于一些大型网络, 可以通过合并一些节点来减少工作点的维度。

与其他文献相比, 本文所构建的 DSG-SR 模型的特点如下:

1) 在 RES 运行模式方面, 本文针对 RES 出力的波动性特点, 考虑了系统 $N-1$ 故障下 RES 出力极端态场景。

2) 由于有源网络存在反向潮流, 支路故障可能比馈线出口故障更为严重, 因此本文完整考虑馈线出口故障及支路故障情况。

3) 在实际系统中, 不同 FL 的响应能力不同, 模型中考虑 FL 响应成本约束。

3.2 求解方法

基于式(4)直流潮流模型对 DSG-SR 进行求解, 获得其对应的安全边界函数解析表达式。模型中忽略网损和电压约束, 配电网线路潮流等于其下游所有节点净功率的代数和。

具体求解步骤如下:

1) 根据直流潮流方程, 得到简化的 DSG-SR 模型。

2) 根据简化的 DSG-SR 模型推导得到原始的安全约束不等式组。

3) 去除式(4)中的绝对值符号使之变为线性不等式, 将所有不等式约束联立, 并剔除冗余约束。然后, 将约束中的不等号改为等号, 得到 DSG-SR 安全边界的函数解析表达式。

鉴于目前分布式智能电网多采用电缆且线路较短, 网络容量约束强于电压约束。因此, 可将 DSG-SR 近似描述为线性、不打结的超平面。此外, 在多数场景下, 直流潮流与交流潮流计算结果偏差很小。采用解析法可直接获得安全域所有边界的解析表达式, 不仅有助于分析 DSG-SR 模型及内在机理, 且显著提高了计算效率。

4 算例分析

使用小型 4 节点配电系统, 观察考虑 RES 常规出力场景和极端态出力场景下 DSG-SR 的特性。在算例研究中, 首先根据 DSSR 模型式(24)计算边界方程, 将其投影到二维空间。然后, 观察安全域在二维空间上的投影, 分析 RES 常规出力场景和极端态出力场景下 DSSR 的象限特征、形状特征和安全性特征。最后, 通过 IEEE RBTS 扩展算例对测试系统的结论进行进一步验证。

4.1 DG 对配电网安全域的影响

配电网 4 节点测试系统如图 1 所示。图中, B_1 、 B_2 、 B_4 、 B_5 为分断开关, B_3 为联络开关, L_i 表示用户。馈线容量为 1 MVA, 负荷功率范围为 $[0, 1.2]$ MVA, DG 出力范围为 $[-0.6, 0]$ MVA。

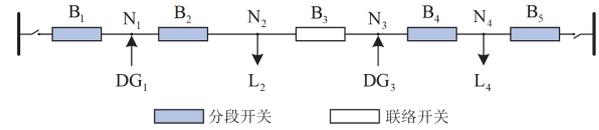


图 1 配电网 4 节点系统

Fig. 1 Distribution network 4-bus system

1) 边界方程

根据正常运行约束及 $N-1$ 约束, 列写完整的边界方程。本文算例中选取馈线出口故障(开关 B_1 退出运行)和支路故障(开关 B_2 退出运行)作为 $N-1$ 故障集。不考虑馈线网络损耗及节点电压约束, 根据式(24)推导系统 $N-1$ 的原始安全约束。然后, 对原始安全约束进行简化, 剔除冗余约束后, 得到配电系统故障集对应的安全边界函数解析式。原始安全约束和简化后得到的安全边界函数解析式如表 1 所示。

表 1 原始安全约束及安全边界

	馈线出口故障(B ₁ 故障)	支路故障(B ₂ 故障)
原始安全约束	$ S_{DG,1} \leq 1,$ $ S_{DG,1} + S_{L,2} \leq 1,$ $ S_{DG,1} + S_{L,2} + S_{DG,3} \leq 1,$ $ S_{DG,1} + S_{L,2} + S_{DG,3} + S_{L,4} \leq 1$	$ S_{DG,1} \leq 1,$ $ S_{L,2} \leq 1,$ $ S_{L,2} + S_{DG,3} \leq 1,$ $ S_{L,2} + S_{DG,3} + S_{L,4} \leq 1$
简化后的安全边界	$S_{DG,1} + S_{L,2} + S_{DG,3} = -1,$ $S_{DG,1} + S_{L,2} + S_{DG,3} + S_{L,4} = 1,$ $S_{DG,1} + S_{L,2} = 1$	$S_{L,2} + S_{DG,3} + S_{L,4} = -1$

本算例中两种故障的计算耗时分别为 4.5 s 和 4.3 s。

2) 图像分析

采用二维可视化方法对 DSG-SR 进行观测。将表 1 简化后的安全边界解析式投影到二维平面进行观测。选取解析式中的 $S_{L,2}$ 和 $S_{DG,3}$ 作为二维观察变量，则 $S_{DG,1}$ 和 $S_{L,4}$ 视为常数， $S_{DG,1} = -0.4$ MVA， $S_{L,4} = 0.6$ MVA。得到两种故障情况下配电系统安全域截面如图 2 所示。

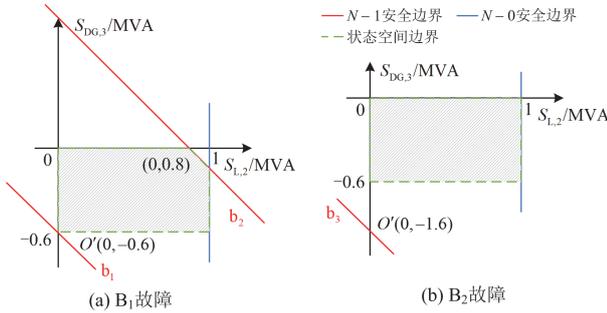


图 2 SG-SR 二维截面
Fig. 2 DSG-SR 2D section

图 2 中红色实线为 $N-1$ 安全边界，蓝色实线为 $N-0$ 安全边界，绿色虚线为 DG 和负荷运行范围构成的状态空间边界。B₁ 故障场景下，系统的 $N-1$ 安全域同时受安全边界 b_1 和 b_2 的影响；B₂ 故障场景下的系统 $N-1$ 安全域则仅受安全边界 b_3 的影响。

改变 $S_{DG,1}$ 和 $S_{L,4}$ 取值，配电系统的 $N-1$ 安全边界会随之改变。 $S_{DG,1}$ 和 $S_{L,4}$ 取不同数值时，得到不同形状的安全域二维截面如图 3 所示。

由图 2 和图 3 可知，DSG-SR 是由系统正常运行边界、 $N-1$ 边界、RES 和 FL 运行特性约束构成的状态空间边界以及坐标轴共同围成的封闭图形，且图形的二维截面形状均为凸形。安全域的二维截面形状随参数改变呈五边形、矩形、梯形、三角形

及六边形。

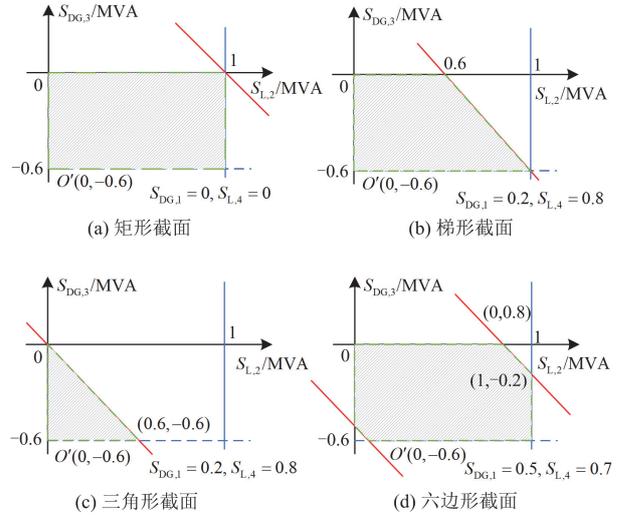


图 3 不同参数下 DSG-SR 二维截面图

Fig. 3 DSG-SR's 2D section for different parameters

若改变观测节点，还可以观测到安全域在其他象限的截面。当选择观测变量为 RES 和 FL 时，DSG-SR 截面位于第二或第四象限；当选择观测变量均为 FL 时，DSG-SR 截面位于第一象限；当选择观测变量全部为 RES 时，DSG-SR 截面则位于第三象限。可见，计及 RES 和 FL 的 DSG-SR 为全象限安全域，其象限位置规律如表 2 所示。

表 2 DSG-SR 二维截面的象限分布

Table 2 Quadrant distribution of DSG-SR 2D section		
X 轴观测节点	Y 轴观测节点	域截面所在象限
FL(流出)	FL(流出)	第一象限
RES(注入)	FL(流出)	第二象限
RES(注入)	RES(注入)	第三象限
FL(流出)	RES(注入)	第四象限

需要指出的是，对于未来储能、电动汽车等新元素接入时导致配电系统运行工况更复杂的情况，本文的 DSG-SR 模型同样适用。当系统单个节点同时包含 RES、FL、储能等多种元件时，节点功率出现双向的情况，此时 DSG-SR 的二维截面图将出现同时覆盖多象限的情况，此处不做讨论。

4.2 新能源出力极端态对 DSG-SR 的影响

4.2.1 DG 运行模式对安全域的影响

为研究 DG 运行模式对 DSG-SR 的影响，选择 $S_{L,2}$ 和 $S_{L,4}$ 作为观测变量。不同 DG 动作模式、可控类型对应场景下的功率参数如表 3 所示。

DSG-SR 的二维图像如图 4 所示。用 $D_{1-1} - D_{1-4}$ 分别表示 DG 场景 $C_{1-1} - C_{1-4}$ 的安全域二维截面，

将图 4 中各二维截面从小到大排序: $D_{1-1} = D_{1-2} < D_{1-3} < D_{1-4}$ 。在系统发生 $N-1$ 故障后, 脱网型 DG 脱离电网, 此时配电网退变为无源网, 有 $D_{1-1} = D_{1-2}$ 。对比 $D_{1-1} - D_{1-4}$ 可见, 并网型 DG 的接入可以扩大 DSG-SR 面积, 且相较于半控型 DG, 全控型 DG 使 DSG-SR 面积增加幅度更大。由图 4 可知, 含并网型 DG 的分布式智能电网, 其 DSG-SR 面积增加幅度与 DG 出力大小呈正相关。

表 3 不同运行场景下的 DG 参数

Table 3 DG parameters with different operation scenarios

运行场景	DG 动作模式	可控类型	$S_G(N-0)/MW$	$S_G(t+1)/MW$
C ₁₋₁	脱网型 DG	半可控型	0.3	0
C ₁₋₂	脱网型 DG	可控型	0.3	0
C ₁₋₃	并网型 DG	半可控型	0.3	0.3
C ₁₋₄	并网型 DG	可控型	0.3	0.4

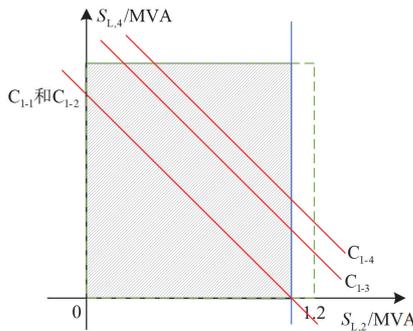


图 4 不同场景下 DSG-SR 二维截面

Fig. 4 DSG-SR's 2D section for different scenarios

4.2.2 新能源出力极端态对安全域的影响

为研究 RES 出力极端态对 DSG-SR 的影响, 本节考虑 RES 出力极端场景发生在 $N-1$ 故障后, 并通过极端出力场景下配电网安全域的观测, 研究其对安全域的影响。本算例中假设 DG_1 为常规并网可控型 DG, DG_3 为风电机组, 为并网半可控性 DG。

本文以季度为单位构建 RES 的出力极端态场景。选取 2022 年春季某日(3 月 15 日)的极端态场景进行展示, 全天划分为 96 个时段, 每个时段的时间间隔为 15 min。根据 3.4.1 节 CIAS 得到风电极端态出力下限为 -39.4%, 构建的风电出力极端态场景如图 5 所示。

1) 边界方程

分别选取时段 28(上午 07:00, $S_G(t) = 0.25$ MVA, $S_G(t+1) = 0.15$ MVA)和时段 96(夜间 23:45, $S_G(t) = 0.03$ MVA, $S_G(t+1) = 0.02$ MVA)作为典型的极端态场景, 得到 RES 极端态场景下的

配电网安全边界如表 4 所示。

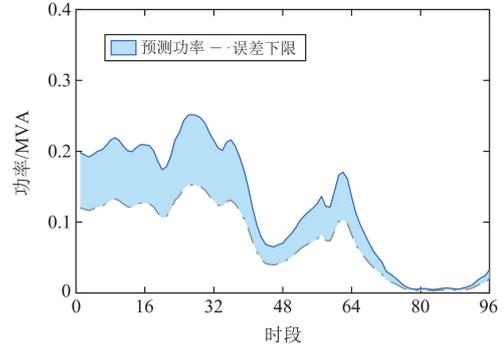


图 5 风电出力极端态场景

Fig. 5 Extreme generation scenarios of wind power

表 4 新能源极端态场景下的安全边界

Table 4 Security boundary with extreme generation scenarios

时段	$N-0$	$N-1$
时段 28	$S_{L,2} = 1, S_{L,4} = 1.25$	$S_{L,2} + S_{L,4} = 1.55$
时段 96	$S_{L,2} = 1, S_{L,4} = 1.03$	$S_{L,2} + S_{L,4} = 1.42$

2) 图像分析

表 4 中两个典型极端态出力场景下 DSG-SR 的二维图像如图 6 所示。

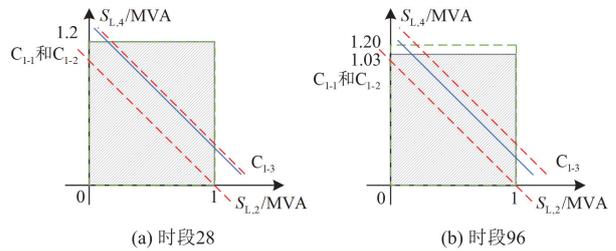


图 6 极端态出力场景下 DSG-SR 的二维截面

Fig. 6 DSG-SR's 2D section for extreme generation scenarios

图 6 中红色虚线与图 4 中 C_{1-1} 、 C_{1-3} 的 $N-1$ 安全边界相对应。由图 6 可见, $N-1$ 之后 DG 出力骤减使得系统安全边界向下平移, 安全域减小。本节 RES 出力极端态场景仅考虑出力发生负偏差的情况, 因此最差的情况下 $N-1$ 安全边界也不会低于 C_{1-1} 所对应的边界。

需要指出的是, 在刻画 RES 极端态下系统的安全域时, $N-0$ 安全边界不可忽略。当 $S_{DG,3} \geq 0.2$ 时, 系统的安全运行边界与状态空间边界重合或位于状态空间边界外侧, 此时满足 $N-1$ 安全, 则 $N-0$ 安全也可同时满足; 当 $S_{DG,3} < 0.2$ 时, 系统的安全运行边界在状态空间边界内侧, 此时系统的安全域同时受 $N-0$ 安全性和 RES 出力减少的双重影响, 导致 $N-1$ 安全性进一步降低。

4.3 柔性负荷对安全域的影响

本节通过对 FL 不同运行场景及成本下 DSG-SR 的可视化观测, 研究 FL 对安全域的影响和作用机理。本节算例选取 4.1 节馈线出口故障的情况进行分析, 不考虑 RES 出力, FL 不同运行场景及其具体调节参数如表 5 所示。

表 5 FL 不同运行场景及其调节参数

Table 5 Different operation scenarios and regulating parameters of FL

运行场景	运行模式	调节系数	
		α_1	α_2
C ₂₋₁	无需求响应	0	0
C ₂₋₂	负荷 L ₂ 和 L ₄ 都参与需求响应	0.4	0.2
C ₂₋₃	只有负荷 L ₂ 参与需求响应	0.4	0

1) 边界方程

根据不同场景下的 FL 运行模式列写系统的安全约束, 经简化后得到考虑 FL 运行模式的配电网安全边界表达式如表 6 所示。

表 6 考虑 FL 运行模式的安全边界表达式

Table 6 Security boundary equations with FL operation model

场景	N-0	N-1
C ₂₋₁	$S_{L,2} = 1, S_{L,4} = 1$	$S_{L,2} + S_{L,4} = 1$
C ₂₋₂		$0.6S_{L,2} + 0.8S_{L,4} = 1$
C ₂₋₃		$0.6S_{L,2} + S_{L,4} = 1$

2) 图像分析

将表 6 不同场景下分布式智能电网的边界方程投影到二维平面上, 如图 7 所示。

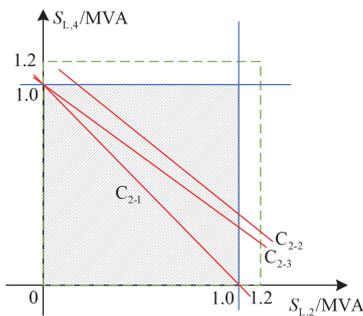


图 7 不同 FL 运行场景的安全域二维截面

Fig. 7 DSG-SR's 2D section for different FL operation scenarios

图 7 中虚线围成的矩形区域为 RES 和 FL 运行特性构成的状态空间截面, 蓝色实线为系统安全运行边界。本文假设 FL 参与调节发生在系统 N-1 故障后, 因此表 6 对应的 3 种场景下安全运行边界相同。

不同的调节系数表示不同 FL 对系统 N-1 安全

性愿意做出用能让步的意愿差异。用 D_{2-1} 、 D_{2-2} 、 D_{2-3} 分别表示场景 C_{2-1} 、 C_{2-2} 、 C_{2-3} 的安全域二维截面。将图 7 中二维截面从小到大排序, 有 $D_{2-1} < D_{2-3} < D_{2-2}$ 。

可见, 相较于无 FL 参与调节的场景, FL 参与调节的效果等效于扩大线路的备用容量, 使系统 DSG-SR 增大。对比场景 C_{2-1} 和 C_{2-3} 可知, 一个 FL 参与需求响应可提升整个配电系统的安全性, 此时不参与调节的负荷也同样获得了 $N-1$ 安全性收益。此外, 通过对比场景 C_{2-2} 和 C_{2-3} 可知, 相较于单个负荷参与系统调节, 多 FL 参与调节可给系统 $N-1$ 安全性带来更大提升。

因此, 分布式智能电网可以通过设计合理的价格引导机制引导 FL 调整其用能策略, 进而优化 DSG-SR 形状, 提升系统总体安全性。

3) FL 响应成本对安全域的影响

为简化分析, 此处仅考虑负荷 L_2 参与响应时其响应成本对系统安全域的影响。设 $S_{L,2} = 1$ MW, 响应成本常系数 $k_1 = 750$, $k_2 = 1500$, 故障后节点 j 供电电价 $\rho_j = 750$ 元/MWh, FL 响应意愿 $\theta = 0.6$, FL 响应后得到的电费折扣 $\eta = 0.85$, 响应补偿价格 $r_j = 300$ 元/MWh。不同成本系数 λ 所对应的 FL 调节系数及响应成本如表 7 所示。

表 7 FL 不同成本系数、调节参数及响应成本

Table 7 Different cost coefficient, regulating parameters and response cost of FL

场景	成本系数 λ	调节系数 α_1	响应成本/元	N-1 安全边界 (B ₁ 故障)
C ₂₋₄	0.8	0.25	600	$0.75S_{L,2} + S_{L,4} = 1$
C ₂₋₅	1.0	0.67	750	$0.33S_{L,2} + S_{L,4} = 1$
C ₂₋₆	1.2	0.86	900	$0.14S_{L,2} + S_{L,4} = 1$

不同响应成本场景下 DSG-SR 二维截面如图 8 所示。设 N-1 安全边界与安全域所在方向坐标轴的

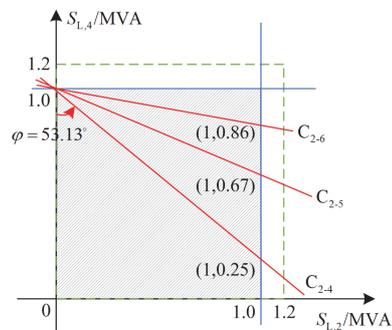


图 8 不同响应成本的安全域二维截面

Fig. 8 DSG-SR's 2D section for different response cost

夹角为 φ , 表 7 中 3 种响应成本场景对应的安全边界夹角 φ 分别为 53.13° 、 71.74° 和 82.03° 。由图 8 可知, 随着成本系数增大, FL 可接受的响应成本增加, 调节系数也随之增大。FL 允许削减负荷的比例增加, 使得系统的 $N-1$ 安全性得到提升。

4) DG 和 FL 对安全域的综合作用机理

基于 4.1 节算例的网架拓扑, 同时考虑 DG 和 FL 运行模式对 DSG-SR 的影响。其中 DG_1 和 DG_3 均为并网可控型 DG, FL 调节策略采取表 5 中的场景 C_{2-3} : $\alpha_1 = 0.4$, $\alpha_2 = 0$ 。边界方程如表 8 所示。

表 8 考虑 DG 和 FL 的安全边界表达式

Table 8 Security boundary equations with DG and FL		
场景	$N-0$	$N-1$
C_{3-1}	$S_{L,2} = 1, S_{L,4} = 1$	$S_{L,2} + S_{L,4} = 1$
C_{3-2}	$S_{L,2} = 1, S_{L,4} = 1.4$	$0.6S_{L,2} + S_{L,4} = 1.8$

表 8 中场景 C_{3-1} 中不考虑 FL 参与调节且认为 DG 为脱网型, 场景 C_{3-2} 考虑 FL 参与调节且认为 DG 为并网可控型。将表 8 中的边界表达式投影到二维平面, 得到 DSG-SR 二维截面如图 9 所示。

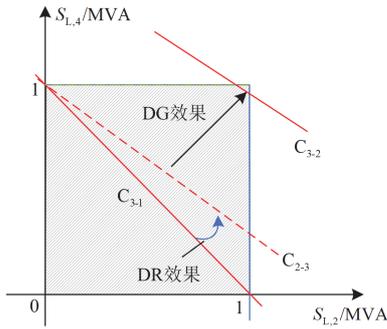


图 9 考虑 DG 和 FL 的安全域二维截面

Fig. 9 DSG-SR's 2D section with DG and FL

图 9 中, 红色实线 C_{3-1} 与图 4、图 7 中的 C_{1-1} 和 C_{2-1} 相同, 等效于不考虑 DG 和 FL 时的传统配电网的安全边界; 红色虚线为图 7 中场景 C_{2-3} 所对应的 $N-1$ 安全边界; 红色实线 C_{3-2} 是同时考虑 DG 和 FL 的分布式智能电网 $N-1$ 安全边界。

由图 9 可知, 同时考虑 DG 和 FL 运行模式对系统 $N-1$ 安全边界的影响, 可等效为这两种因素单独作用效果的叠加。从模型的角度分析, 其影响机理在于本文的 DSG-SR 模型本质上是一个线性模型, 因此不同因素对模型的作用效果可进行叠加。基于前述 DSG-SR 的二维截面图, 进一步分析 DG 和 FL 对 DSG-SR 的影响。本文选择几何安全距离来衡量运行点的安全性, 定义为工作点到有效安全边界的垂直距离, 它描述了某个安全边界的几个相

关变量同时增大时, 在欧式空间中最短达到安全边界的功率裕度^[34]。

在图 8 安全域内任取一点 $O'(0.2, 0.5)$ MVA, O' 与安全运行边界、 $N-1$ 安全边界的距离分别表示为 d_{α_1} 至 d_{α_5} , 如图 10 所示。 O' 的安全性由 d_{α_1} 至 d_{α_5} 表示。

由图 10 可知, 运行点 O' 与 3 种场景 (C_{3-1} 、 C_{2-3} 和 C_{3-2}) 下 $N-1$ 安全边界的距离 $d_{\alpha_5} < d_{\alpha_4} < d_{\alpha_3}$, C_{3-1} 场景下运行点 O' 的安全性最低。因此, 坐标原点 (即零负荷点) 是配电网的最安全点。工作点越接近坐标原点, 则其安全性越高。同时, FL 参与调节导致的安全边界上扬、DG 出力增加导致的安全边界向上平移都有利于系统安全性的提升。

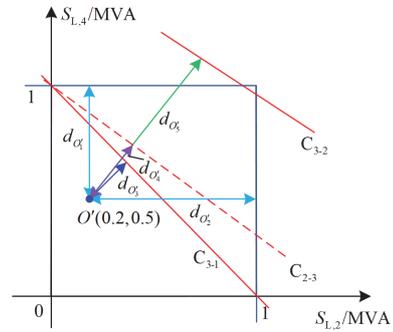


图 10 安全距离分析

Fig. 10 Safety distance analysis

4.4 扩展算例分析

采用 IEEE RBTS 104 节点测试系统来验证 4 节点测试系统的特性。测试系统共有 3 座 110 kV 变电站, 6 台主变, 20 条馈线以及 104 个节点, 如附录 A 图 A1 所示。所有 DG 的总容量为 13.1 MVA, 系统峰值负荷为 40 MVA, 容量渗透率为 32.75%。测试系统主变容量为 10 MVA, 具体参数如附录 A 表 A1 所示。

本算例中考虑馈线出口故障 (LP32 馈线出口)、支路故障 (LP34 至 LP35 支路) 以及割集 (LP32 至 LP34 作为一个割集) 的情况。由于系统中节点数量较多, 因此将部分节点整合起来, 使边界方程表述更简洁。令

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^7 S_{L,i} = S_{F1} \\ \sum_{i=32}^{34} S_{L,i} = S_{F7A} \\ \sum_{i=35,37,38} S_{L,i} + S_{G,37} = S_{F7B} \\ \sum_{i=57} S_{L,i} = S_{F11} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=94}^{98} S_{L,i} + S_{G,97} = S_{F19} \\ \sum_{i=99}^{104} S_{L,i} + S_{G,104} = S_{F20} \\ \sum_{i=77}^{80} S_{L,i} = S_{F15} \\ \sum_{i=86}^{89} S_{L,i} + S_{G,89} = S_{F17} \end{array} \right. \quad (25)$$

得到测试系统的安全约束如表 9 所示。

表 9 IEEE RBTS 系统安全约束

Table 9 Security constraints of IEEE RBTS system

安全约束	
$N=0$	$ S_{F7B} + S_{G,35} + S_{L,36} \leq 5.83,$
	$ S_{F7A} + S_{F7B} + S_{G,35} + S_{L,36} \leq 5.83,$
	$ S_{F19} + S_{F20} + S_{F7A} + S_{F7B} + S_{G,35} + S_{L,36} \leq 10$
$N=1$	$ S_{F1} + S_{F7B} + S_{G,35} + S_{L,36} \leq 5.83,$
	$ S_{F1} + S_{F7A} + S_{F7B} + S_{G,35} + S_{L,36} \leq 5.83,$
	$ S_{F11} + S_{F19} + S_{F20} + S_{F7A} + S_{F7B} + S_{G,35} + S_{L,36} \leq 10,$
	$ S_{F15} + S_{F19} + S_{F20} + S_{F7A} + S_{F7B} + S_{G,35} + S_{L,36} \leq 10,$
	$ S_{F17} + S_{F19} + S_{F20} + S_{F7A} + S_{F7B} + S_{G,35} + S_{L,36} \leq 10$

经简化后最终得到有效的边界方程为

$$\begin{cases} S_{F1} + S_{F7A} + S_{F7B} + (S_{G,35} + S_{L,36}) = 5.83 \\ S_{F11} + S_{F19} + S_{F20} + S_{F7A} + S_{F7B} + (S_{G,35} + S_{L,36}) = 10 \\ S_{F15} + S_{F19} + S_{F20} + S_{F7A} + S_{F7B} + (S_{G,35} + S_{L,36}) = 10 \\ S_{F17} + S_{F19} + S_{F20} + S_{F7A} + S_{F7B} + (S_{G,35} + S_{L,36}) = 10 \\ -S_{F17} - S_{F19} - S_{F20} - S_{F7A} - S_{F7B} - (S_{G,35} + S_{L,36}) = 10 \\ -S_{F7B} - (S_{G,35} + S_{L,36}) = 5.83 \\ -S_{F19} - S_{F20} - S_{F7A} - S_{F7B} - (S_{G,35} + S_{L,36}) = 10 \end{cases} \quad (26)$$

DG_{35} 的上限为-2.0, L_{36} 的上限为 2.5。扩展算

附录 A

例计算耗时为 6.7 s。选取 DG_{35} 和 L_{36} 作为观测变量, IEEE RBTS 算例的结论与 4 节点系统的结论一致。为使行文结构简洁, 实际算例的完整结果如附录 B 所示。

5 结论

本文提出了计及 RES 和 FL 的 DSG-SR 模型, 采用简单算例和 IEEE RBTS 扩展算例验证, 观测安全域的二维截面图, 所得结论如下:

- 1) 计及 RES 和 FL 的安全域覆盖全象限, 且变量参数选择不同, 安全域的二维截面图可能呈现矩形、五边形、六边形、梯形、三角形。
- 2) 脱网型 DG 对安全域没有影响; 并网型电源等效扩大了支路容量, 使系统 $N-1$ 安全性提升。
- 3) RES 极端态出力场景可能缩小安全域, 在考虑配电网 $N-1$ 安全性时需要关注 RES 出力不确定性, 以便制定相应的调节策略, 优化系统安全域。
- 4) 受 DG 和 FL 共同作用, DSG-SR 的最安全点由零负荷点转变为 DG 出力最大且负荷空载的工作点。
- 5) FL 响应成本会影响其调节系数, 进而改变系统 $N-1$ 安全边界, 系统安全域的大小可作为量化 FL 用能削减激励机制成效的一种指标。

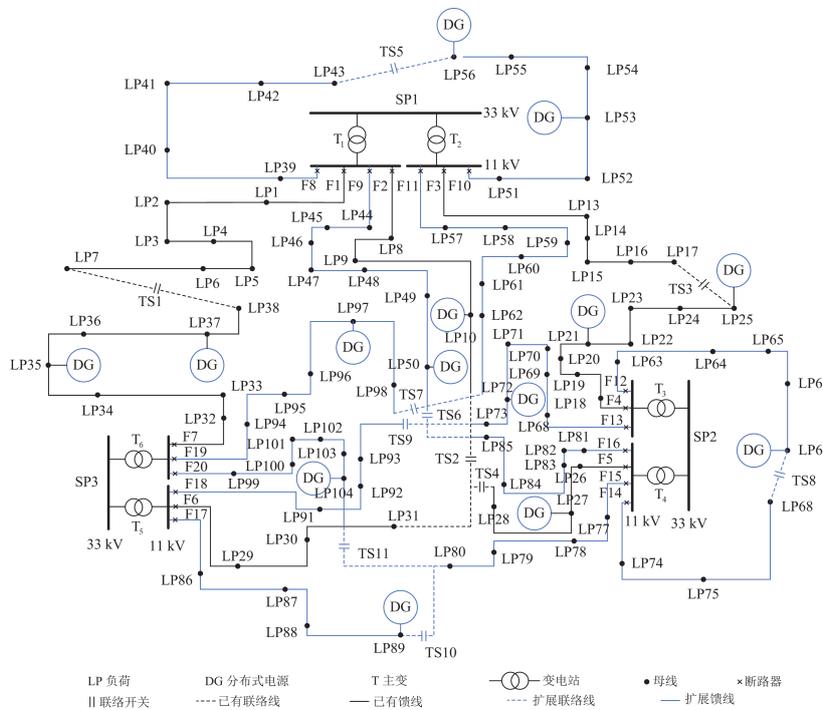


图 A1 IEEE RBTS 测试系统

Fig. A1 IEEE RBTS test system

附录 B

1) 观测结果

4.4 节算例中 IEEE RBTS 节点测试系统具体参数如表 B1 所示。

表 B1 IEEE RBTS 测试系统具体参数

Table B1 Parameters of IEEE RBTS test system

馈线	起止节点	馈线峰值负荷/MVA	DG 节点	峰值负荷 DG 功率/MVA	DG 容量/MVA	馈线容量/MVA
F1	1-7	2.78				6.91
F2	8-10	2.45	10	0.6	1.2	6.91
F8	39-43	3.26				6.91
F9	44-50	2.92	50	0.9	1.5	6.91
F3	11-17	2.10				6.91
F10	51-56	1.83	53,56	1.2	1.8	6.91
F11	57-62	1.70				6.91
F4	18-25	2.82	21,25	1.5	1.8	6.91
F12	63-67	1.56	67	0.9	1.5	6.91
F13	68-73	2.14	72	0.9	1.5	6.91
F5	26-28	0.98	27	0.6	1.2	6.91
F14	74-76	0.98				6.91
F15	77-80	1.30				6.91
F16	81-85	1.63				6.91
F6	29-31	2.04				6.91
F17	86-89	1.59	89	0.6	1.2	5.83
F18	90-93	2.08				5.83
F7	32-38	2.23	35,37	1.2	0.6,1.5	5.83
F19	94-98	1.74	97	0.9	1.5	5.83
F20	99-104	1.88	104	0.6	1.2	5.83

将大部分负荷变量都取其上限, 少量负荷设定为固定值, DG 输出设为 0。将有效边界方程投影到二维平面, 得到关于 DG_{35} 和 L_{36} 的安全域截面如图 B1 所示。

2) 不同类型 DG 下 DSG-SR 形状

脱网半可控型 DG、脱网可控型 DG、并网半可控型 DG 以及并网可控型 DG 对应的安全边界分别表示为 I-1、I-2、I-3、I-4。不同场景下对应的安全边界如图 B2 所示。

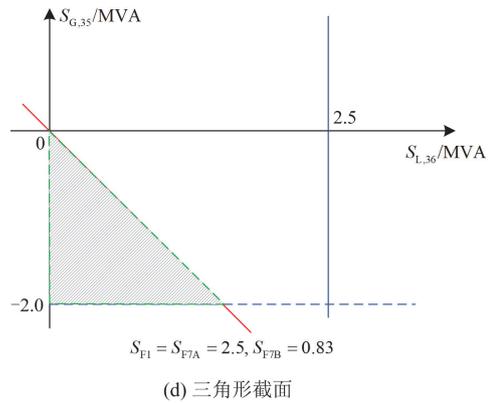
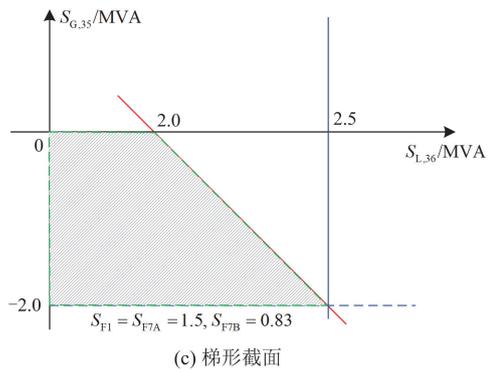
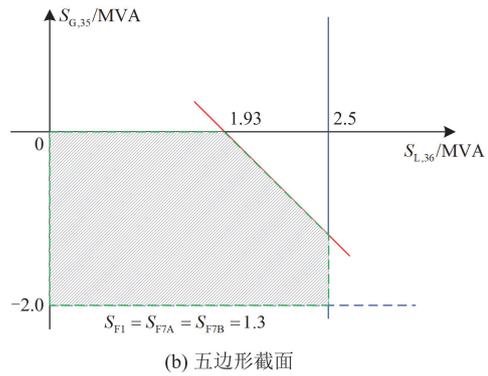
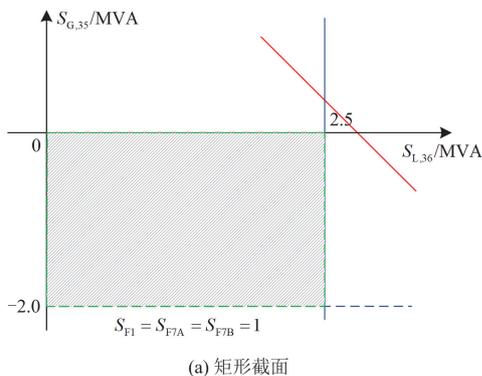


图 B1 IEEE RBTS 系统安全域截面

Fig. B1 Security region section of IEEE RBTS system

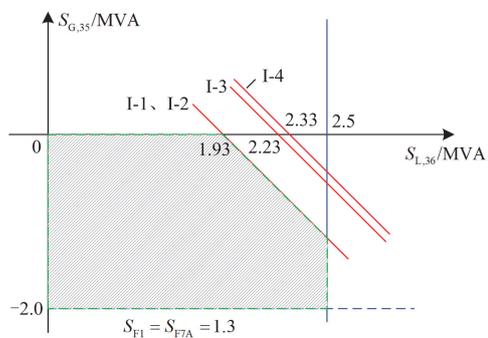


图 B2 不同类型 DG 下的安全域截面

Fig. B2 Security region section for different DGs

3) RES 极端态出力场景下安全域形状

假设 DG37 为 RES 电源, 选取的极端态出力场景与 4.2 节相同。所选极端态对应的安全边界分别表示为 II-1、II-2, 对应的安全边界如图 B3 所示。

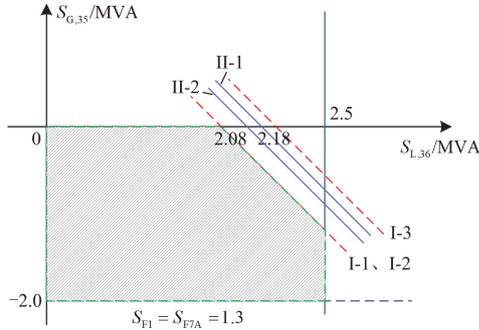


图 B3 不同极端态出力场景下的安全域截面

Fig. B3 Security region section for different extreme generation scenarios

4) 不同 FL 场景下安全域形状

本算例中考虑 F1 和 F7A 不同 FL 场景对配电网安全域的影响。假设 DG 出力为 0, 不同 FL 场景分别表示为 III-1、III-2 和 III-3, 对应的削减负荷参数如表 B2 所示。

表 B2 FL 运行模式及削减负荷参数

Table B2 FL operation mode and load reduction parameters

场景	FL 运行模式	α_1	α_2
III-1	无需求响应	0	0
III-2	F1 和 F7A 都参与需求响应	0.4	0.2
III-3	只有用户 F7A 参与需求响应	0	0.2

不同 FL 运行模式下的 DSG-SR 二维截面如图 B4 所示。

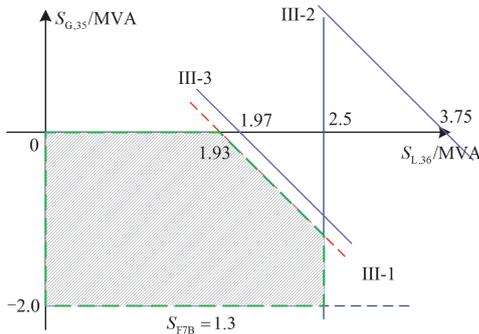


图 B4 不同 FL 运行模式下 DSG-SR 二维截面

Fig. B4 DSG-SR 2D section for different FL operation modes

参考文献

[1] 程杉, 傅桐, 李泮洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.

CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.

[2] 任洪波, 王楠, 吴琼, 等. 考虑阶梯型碳交易的多负荷聚合商协同优化调度与成本分配[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 171-182.

REN Hongbo, WANG Nan, WU Qiong, et al. Collaborative optimal scheduling and cost allocation of multiload aggregator considering ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 171-182.

[3] 李若琼, 司宇杰, 杨承辰, 等. 考虑柔性负荷的新型电力系统源荷日前-日内低碳优化调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 116-129.

LI Ruoqiong, SI Yujie, YANG Chengchen, et al. Day-ahead and intra-day low-carbon optimal scheduling of new power system source-load considering flexible load[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(3): 116-129.

[4] 唐文虎, 黄文威, 郭采珊, 等. 分布式智能电网的理论发展与技术体系[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 855-867.

TANG Wenhui, HUANG Wenwei, GUO Caishan, et al. Exploration on theoretical and technological framework of distributed smart grid[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 855-867.

[5] 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.

[6] ZU G, XIAO J, SUN K. Mathematical base and deduction of security region for distribution systems with DER[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(3): 2892-2903.

[7] XIAO J, ZU G, ZHOU H, et al. Total quadrant security region for active distribution network with high penetration of distributed generation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 9(1): 128-137.

[8] 肖峻, 李承晋, 屈玉清, 等. 含储能有源配电网的运行域模型、求解及机理分析[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5181-5199.

XIAO Jun, LI Chengjin, QU Yuqing, et al. Dispatchable region model and its solution and mechanism for active distribution network with energy storage[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5181-5199.

[9] 祖国强, 肖峻, 穆云飞, 等. 计及分布式电源与需求响应的智能配电网安全域[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 100-107.

- ZU Guoqiang, XIAO Jun, MU Yunfei, et al. Security region for smart distribution system considering distributed generator and demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(8): 100-107.
- [10] 马瑞, 敖维安. 三相不平衡主动配电网随机模糊安全距离研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(23): 7600-7609. MA Rui, AO Weian. Research on stochastic fuzzy safety distance of active distribution network considering three-phase unbalance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(23): 7600-7609.
- [11] 祖国强, 郝子源, 王智爽, 等. 基于 $N-1$ 安全域的配电台区电动汽车可充电裕量监测方法[J]. *供用电*, 2023, 40(9): 9-15. ZU Guoqiang, HAO Ziyuan, WANG Zhishuang, et al. Charging margin monitoring method for electric vehicles in distribution transformer service area based on $N-1$ distribution network security region[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(9): 9-15.
- [12] 裴蕾, 卫志农, 陈胜, 等. 计及光伏出力波动的交直流混合配电网安全域模型[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 4084-4093. PEI Lei, WEI Zhinong, CHEN Sheng, et al. Security region of variable photovoltaic generation in AC-DC hybrid distribution power networks[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 4084-4093.
- [13] 辛建波, 杨程祥, 舒展, 等. 基于静态安全域的交直流混联大电网关键线路辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(6): 165-172. XIN Jianbo, YANG Chengxiang, SHU Zhan, et al. Identification of critical lines in AC/DC hybrid large power grid based on steady-state security region[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 165-172.
- [14] 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.
- [15] 王丹, 李思源, 贾宏杰, 等. 含可再生能源的区域综合能源系统区间化安全域研究(一): 概念、建模与降维观测[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3188-3204. WANG Dan, LI Siyuan, JIA Hongjie, et al. Research on interval security region of regional integrated energy system integrated with renewable energy sources (part I): concepts, modeling and dimension reduction observation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9): 3188-3204.
- [16] 王佳旭, 苗世洪, 王延涛, 等. 考虑风电爬坡限幅及频率安全约束的高比例风电电力系统多层次优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(1): 135-146. WANG Jiayu, MIAO Shihong, WANG Yantao, et al. Multi-level optimal dispatch strategy for a high proportion of wind power system considering the wind power ramping limit and frequency security constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(1): 135-146.
- [17] SUN B, LI Y, ZENG Y, et al. Optimization planning method of distributed generation based on steady-state security region of distribution network[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 4209-4222.
- [18] WU S, WANG Q, CHEN Q, et al. Cyber-physical integrated planning of distribution networks considering spatial-temporal flexible resources[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(3): 142-156.
- [19] 果莹, 王丹, 李思源, 等. 基于安全域的区域综合能源系统储能优化配置[J]. *电网技术*, 2022, 46(2): 604-614. GUO Ying, WANG Dan, LI Siyuan, et al. Optimal allocation of energy storage in regional integrated energy system based on security region[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 604-614.
- [20] CHEN J, SUN B, LI Y, et al. Credible capacity calculation method of distributed generation based on equal power supply reliability criterion[J]. *Renewable Energy*, 2022, 201: 534-547.
- [21] 郝子源. 计及输配协调需求响应的配电网安全域与供电能力研究[D]. 天津: 天津大学, 2020. HAO Ziyuan. Research on distribution system security region and total supply capability considering demand response with transmission and distribution coordination[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [22] 张勇军, 羿应棋, 李立涅, 等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(22): 1-12. ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(22): 1-12.
- [23] 王素红, 唐煜星, 郭文豪, 等. 考虑优先级的智能电网业务调度与资源分配方案[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(4): 59-70, 79. WANG Suhong, TANG Yuxing, GUO Wenhao, et al. Service scheduling and resource allocation scheme of smart grid considering priority[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(4): 59-70, 79.
- [24] 常馨月, 刘国伟, 许银亮, 等. 考虑电网约束的多类型分布式资源集群能量交易与利益分配方法[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(4): 156-166. CHANG Xinyue, LIU Guowei, XU Yinliang, et al. Multiple

- distributed resource energy clusters energy trading and interests allocation approach considering power network constraints[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(4): 156-166.
- [25] 刘东铭, 曾庆彬, 张勇军, 等. 基于三维空间的新型配电网关键技术时空适应性评估[J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(10): 1489-1499.
LIU Dongming, ZENG Qingbin, ZHANG Yongjun, et al. Spatio-temporal adaptation assessment of key technologies of new distribution network based on 3D space[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2024, 58(10): 1489-1499.
- [26] 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.
- [27] 肖峻, 李思岑, 王丹. 计及用户分级与互动的配电网最大供电能力模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 19-25, 41.
XIAO Jun, LI Sicen, WANG Dan. Model of total supply capability for distribution network considering customer classification and interaction[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 19-25, 41.
- [28] 李思岑. 计及用户分级与互动的配电网最大供电能力及安全域模型[D]. 天津: 天津大学, 2017.
LI Sicen. Total supply capability and distribution system security region considering customer classification and interaction[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [29] 姚宇, 叶承晋, 朱超, 等. 考虑需求侧快速响应资源的数据驱动频率约束经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(2): 34-45.
YAO Yu, YE Chengjin, ZHU Chao, et al. Data-driven frequency constrained economic dispatch considering fast demand resources[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(2): 34-45.
- [30] XIAO J, ZHANG M, BAI L, et al. Boundary supply capability for distribution systems: concept, indices and calculation[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(2): 499-506.
- [31] 苗璐, 樊玮, 肖红燕, 等. 基于改进 FCM 聚类的光伏电站出力场景特性研究[J]. *广东电力*, 2024, 37(3): 1-11.
MIAO Lu, FAN Wei, XIAO Hongyan, et al. Study on typical output scenario characteristics of photovoltaic power station based on improved FCM clustering[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(3): 1-11.
- [32] TAN Y, GUAN L, HUANG J, et al. A multi-stage data-driven IGDT-RO model with chance compensation for optimizing bidding of RES aggregator in competitive electricity markets[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 154.
- [33] 谭颖, 管霖. 基于数据驱动信息间隙理论的风光水储聚合商多元市场竞争标决策模型[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 979-991.
TAN Ying, GUAN Lin. A data-driven information gap theory based joint decision model for aggregator with wind-solar-hydro power and storage resources in multiple power markets[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 979-991.
- [34] 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.

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2025-04-21

作者简介:

史训涛(1986—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电自动化、智能配电设备; E-mail: shixt@csg.cn

柯清派(1994—), 男, 研究员, 工学硕士, 主要研究方向为配电网运行控制技术、配电网自动化; E-mail: keqp@csg.cn

谭颖(1990—), 女, 通信作者, 工学博士, 主要研究方向为电力市场、智能电网运行优化技术。E-mail: 924701132@qq.com

(编辑 魏小丽)