



海纳百川 有容乃大

超大型城市复杂配电网高效重构自愈控制方法

高红均 副教授/博士生导师

四川大学电气工程学院

四川大学智能电网分析与运营控制研究室



公众号：电力干货

➤ 研究背景

➤ 分层分布式协同重构运行架构

➤ 重过载自愈运行方式主动控制

➤ 故障自愈分布式高效复电控制

□ 国家双碳战略低碳绿色要求

- ◆ 2020年9月，习近平总书记在第七十五届联合国大会上正式提出了碳达峰、碳中和的双碳目标战略。
- ◆ 根据国家能源局数据，2023年上半年我国光伏新增装机7842.3万千瓦，其中，分布式新增装机4096.3万千瓦，占比52.2%。分布式新能源大量接入配电网，甚至超过传统集中式新能源装机规模。



高比例新能源接入



电气化负荷的发展



新能源出力波动性

负荷需求的不确定性

大量电力电子设备接入配电网

电气化负荷高碳排



- ✓ 如何提高配电网清洁能源消纳、供需平衡
- ✓ 如何提高能源利用效率
- ✓ 如何提供灵活的电能管理，促进负荷低碳化



“双碳目标”的提出



城市配电网的低碳化运行成为要求

- ✓ 如何实现配电网安全经济低碳运行、碳损耗最小

□ 世界一流配电网可靠性需求



北、上、广、深

城市化进程

飞速发展

- ◆ 许多城市已跻身国际一线大都市
- ◆ 电气化程度升高、用能需求多样化

要求

- ✓ 持续、稳定供电能力
- ✓ 灵活的负荷管理能力
- ✓ 故障预测与预防的能力
- ✓ 快速定位的故障恢复能力

我国2022年度：➢ 用户平均供电可靠率为99.869%

➢ 用户平均停电时间9.10小时/户

存在
差距

世界一流配电网

- 供电可靠率 $\geq 99.999\%$
- 用户年平均停电时间 ≤ 5 分钟

故障快速恢复

灵活性需求

出力波动不确定性

潮流分配不均

方法

开关倒闸转供

对网络中的联络开关和分段开关进行状态控制、倒闸操作，完成负荷的转供

优点

供电能力提升
安全稳定运行

城市电网保供问题日益凸显，尤其是在迎峰度夏/度冬负荷高峰期供电能力面临严峻挑战。

作为配电网运行管理的关键技术之一，动态重构通过对**分段开关**和**联络开关**的组合状态进行动态调整，能够改善调度周期内的网络潮流分布，在促进**清洁能源消纳**和提高**用户供电可靠性**方面具有关键地位。



经济持续稳定恢复
全社会用电量持续增长



能源供给清洁化低碳化
新能源逐渐成为装机和电量主体



多省面临“能耗
双控”压力，高
耗能企业拉闸限
电常态化

□提高电网供电能力



时空灵活性需求



□提高清洁能源消纳



光伏大规模接入，
净负荷时空分布
不均衡，弃光现
象严重

有效途径

动态重构

- 远程自动控制开关
- 改善潮流分布
- 实现灵活运行

挑战



- 非线性潮流特性
- 大量二进制变量

- 大规模潮流转移
- 全局动态重构模型求解困难
- 数据通信压力和计算能耗过大



优先局部自治
滞后全局协调

配电网分层自治运行管理

□ 超大型城市配电网结构复杂



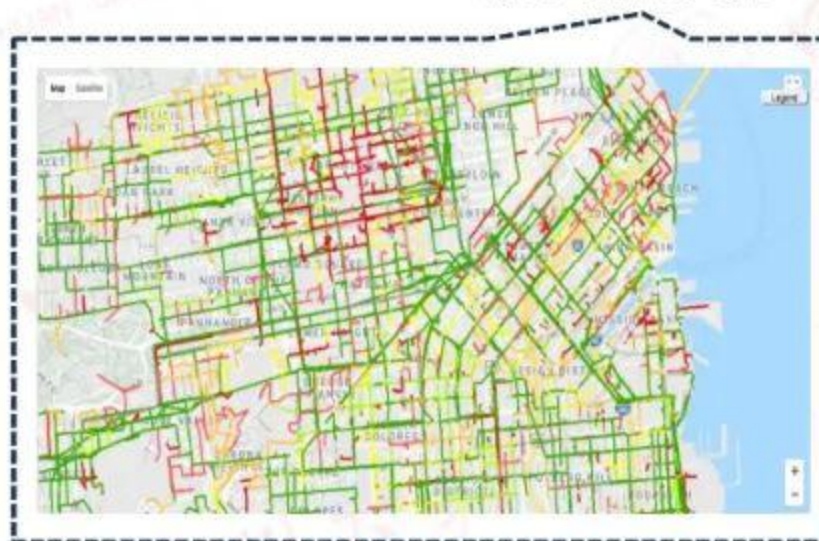
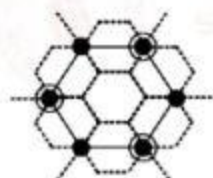
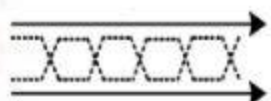
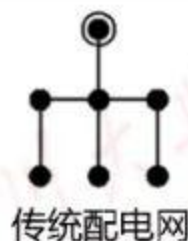
城市负荷高速增长



高比例清洁能源接入

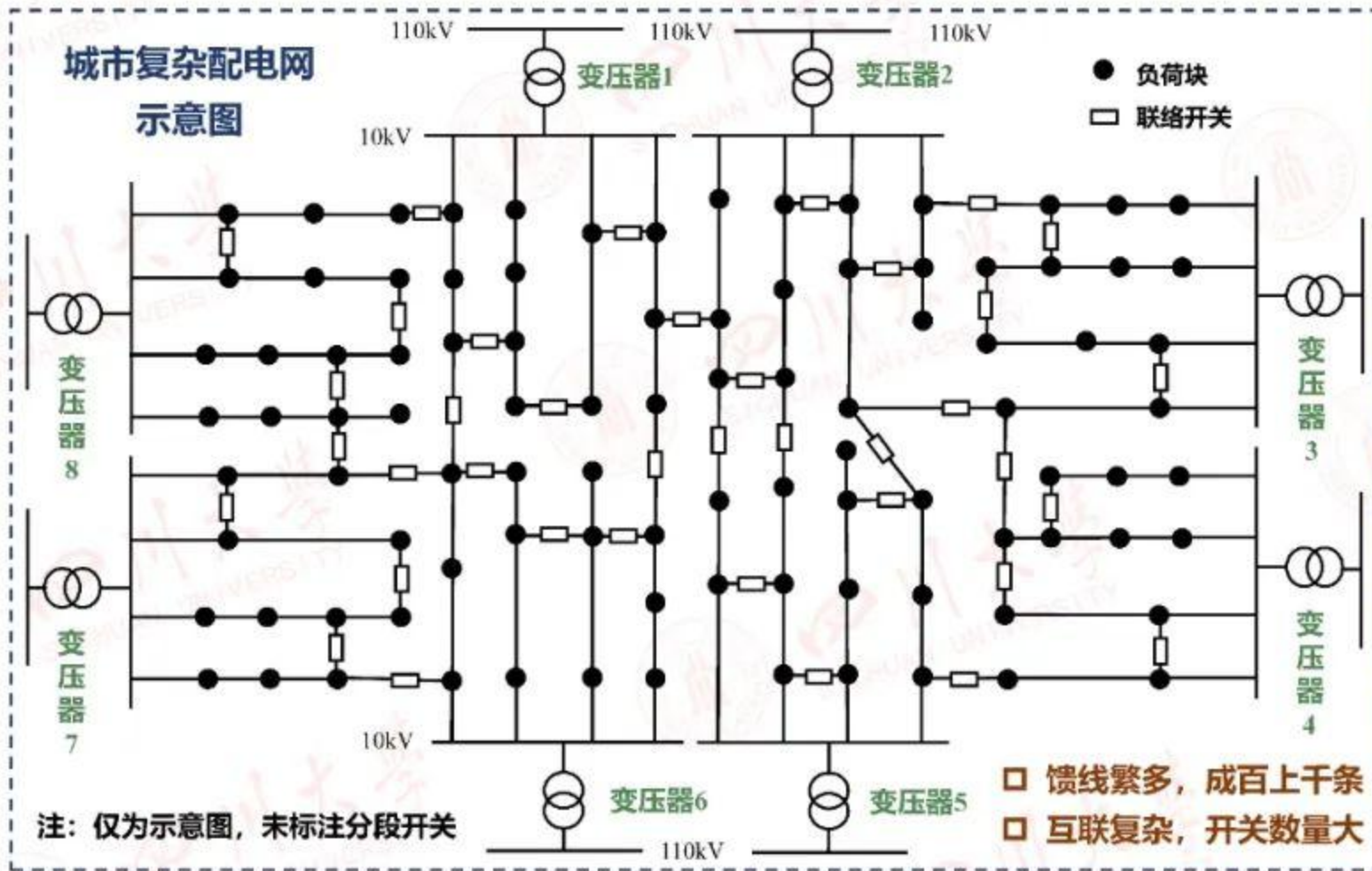


高比例电力电子设备接入



特大型城市负荷高速增长与“双高”的接入，导致城市配电网网架规模愈发巨大。目前，广州城市配电网具有**8000多条10kV馈线**，以及**数以万计的联络开关与分段开关**，由于城市配电网本身具备多个电压等级，且大量开关的投入导致配电网存在广泛的**弱耦合关系**，从而使得特大型城市配电网**网架结构非常复杂**，难以进行优化分析计算。

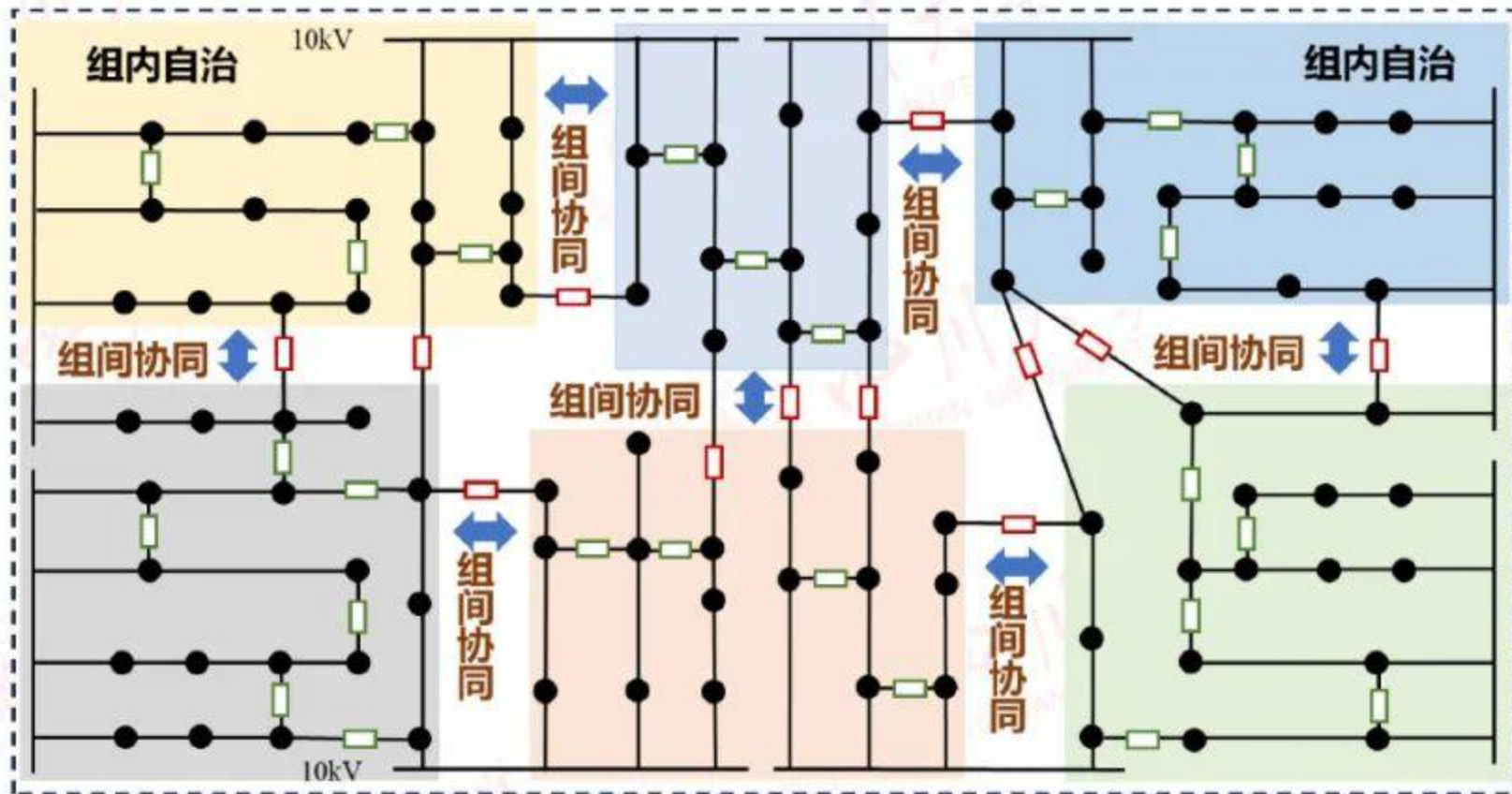
- 提高城市配电网可靠性最常用且高效的调控手段为网络重构（开关重构）；
- 我国城市配电网结构存在明显的复杂特性：馈线繁多，且互联关系复杂；
- 大规模互联馈线交织在一起，开关数量大，重构运行决策为大规模组合优化问题，很难满足实际调控的秒级决策时间要求；
- 复杂的联络关系不利于简明高效的调控应用需求



- 研究背景
- 分层分布式协同重构运行架构
- 重过载自愈运行方式主动控制
- 故障自愈分布式高效复电控制

分层分布式协同重构运行架构

- 提出了“**馈线组**”思想，大大降低了原大规模配电网耦合重构问题的求解难度，提高了实际配电网运行调控效率。
- 以“**先组内自治、后组间协同**”的思路开展重构调控高效决策
- 故障后非故障区段负荷恢复、迎峰度夏/度冬期负荷转供；
- 达到“**故障快复电、高峰少停电**”目标。



↑ 高效重构

□ 联络开关转供能力不一



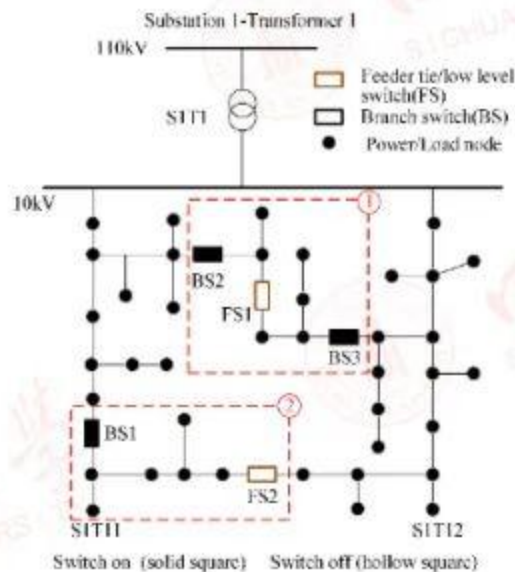
① 馈线聚类分组 ② 组内自治优化 ③ 组间协同互济

多类型联络开关

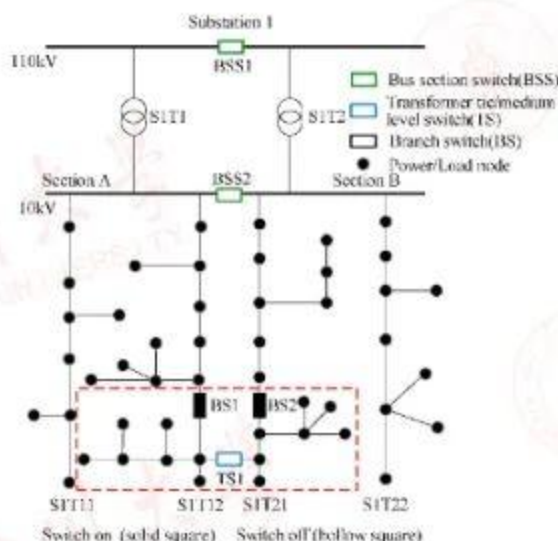
多级重构模式

通过调节**馈线联络开关**、**变压器联络开关**、**变电站联络开关**与分段开关的开关状态组合，可以分别实现同一变压器供电、不同变压器供电和不同变电站供电的两条馈线之间的净负荷转移，即“馈线-变压器-变电站”三个层级的潮流转移。

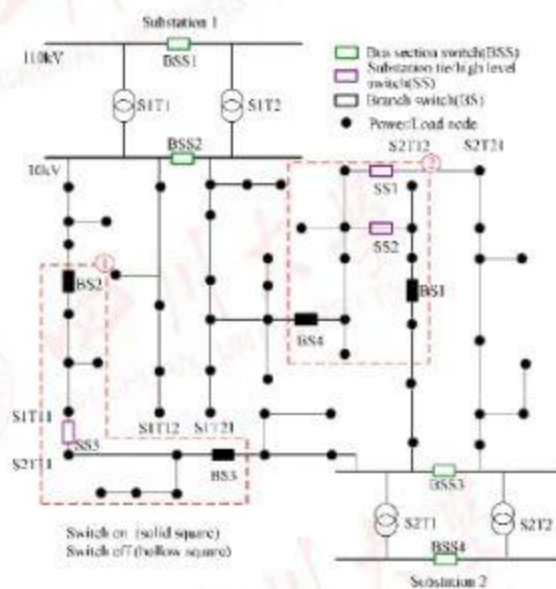
馈线潮流转移



变压器潮流转移



变电站潮流转移

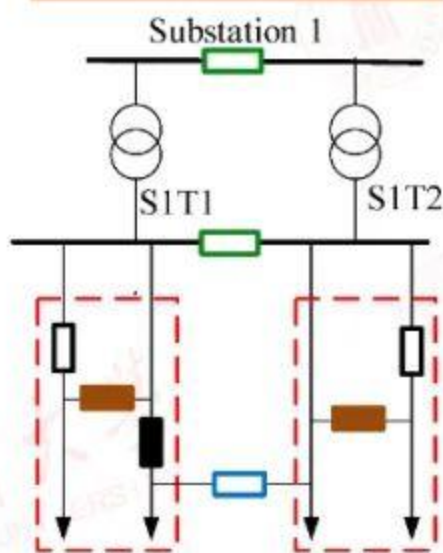


✓ 配电网自然分层特性：馈线层、变压器层、变电站层

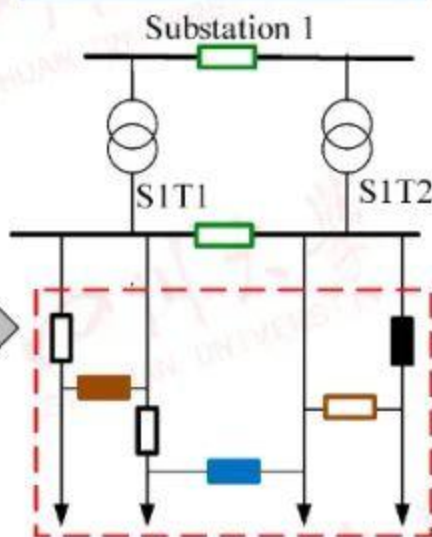
➤ 多层级平衡机制

建立**分层自治、逐级递进**（变压器内馈线间-站内
馈线间-站间）的多层级平衡机制（如图所示）

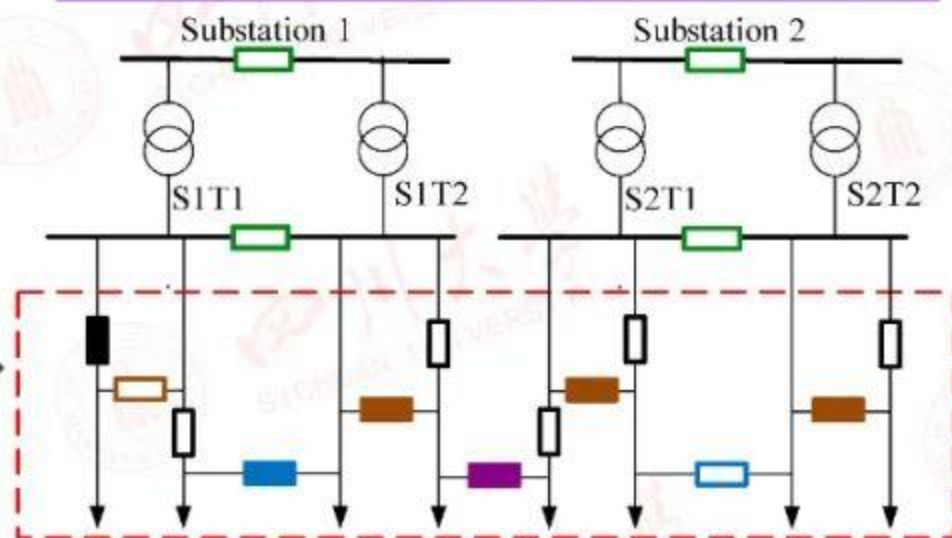
馈线级平衡运行



变压器级平衡运行



变电站级平衡运行



配电网重构级别包括三类：**馈线级、变压器级、变电站级**，不同级别的联络开关(潮流转移)参与类别不同。馈线级、变压器级、变电站级重构的**潮流分布调节范围逐渐扩大**，重构区域由单一变压器到单一变电站再到多变电站，实现了**由局部自治到大范围协调**的多层级平衡运行。

➤ 复杂配电网联络开关重要度量化-正常运行态转供能力

开关贡献度量化方法

- 针对样本m,供电提升以及光伏消纳能力的指标量化:

$$T_{sub,t}^{lr} = \sum_{i \in B_{sub}^{lr}} \Delta P_{i,t}^{lr} / \sum_{t=1}^{t=24} \sum_{i \in B_{sub}^{lr}} \Delta P_{i,t}^{lr}$$

$$T_{sub,t}^{pv} = \sum_{i \in B_{sub}^{pv}} \Delta P_{i,t}^{pv} / \sum_{t=1}^{t=24} \sum_{i \in B_{sub}^{pv}} \Delta P_{i,t}^{pv}$$

- 开关ij的24小时供电能力以及光伏消纳能力量化:

$$e_{ij,t}^{lr} = \begin{cases} T_{sub,t}^{lr} g & |w_{ij,t} - w_{ij,t-1}| = 0 \\ T_{sub,t}^{lr} g & |w_{ij,t} - w_{ij,t-1}| = 1 \end{cases}$$
$$e_{ij,t}^{pv} = \begin{cases} T_{sub,t}^{pv} g & |w_{ij,t} - w_{ij,t-1}| = 0 \\ T_{sub,t}^{pv} g & |w_{ij,t} - w_{ij,t-1}| = 1 \end{cases}$$

- 在M个样本下开关ij的两类指标量化值:

$$E_{ij}^{lr} = \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} e_{ij,t,m}^{lr} / M$$

$$E_{ij}^{pv} = \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} e_{ij,t,m}^{pv} / M$$

$$E_{ij} = \lambda E_{ij}^{lr} + (1 - \lambda) E_{ij}^{pv}$$

- 对于处在两变电站之间的联络开关,取平均值:

$$E_{ij} = \frac{E_{ij,sub_a} + E_{ij,sub_{a+1}}}{2}$$

开关数量削减规则

- 考虑到分段开关与联络开关有着本质的区别,所以在评估和削减时要对这两类开关分开进行:

- 分段开关普遍贡献度较低
- 重构操作离不开联络开关,普遍贡献度较高

- 对开关的贡献度量化值进行排序,分界为50%:

- 如果开关的贡献度量化值排名高于50%,则认定为重要开关
- 如果开关的贡献度量化值排名低于50%,则认定为非重要开关

- 在重构决策模型中,忽略非重要开关:

- 非重要的分段开关恒定闭合,非重要的联络开关恒定打开
- 将重要开关的动作组合作为模型的决策对象

➤ 复杂配电网联络开关重要度量化-故障恢复态转供能力

● 联络开关重要度综合量化方法

联络开关负荷恢复能力计算

电源节点 v_i —联络开关 d 对应的独立负荷块 (负荷恢复能力)

$$L^{i-d,ind} = L^{i-d,*} - L^{i-d,*} \cap (L^{i-1,*} \cup L^{i-2,*} \cup \dots \cup L^{i-(d-1),*} \cup L^{i-(d+1),*} \cup \dots \cup L^{i-n,*})$$

多个电源节点如何处理?

假定有 c 个电源节点 $s_1, \dots, s_c$, 对于第 d 条联络开关 kl (lk), 其综合负荷恢复能力为:

$$LR^d = \max(L^{s_1-d,ind}, L^{s_2-d,ind}, \dots, L^{s_c-d,ind}) + \max(L^{s_{g+1}-d,ind}, L^{s_{g+2}-d,ind}, \dots, L^{s_g-d,ind})$$

负荷链先后经过“ $s-k-l$ ”的联络开关 k 侧的所有独立负荷块集合

$$s_{g+1}-d, s_{g+2}-d, \dots, s_c-d$$

负荷链先后经过“ $s-l-k$ ”的联络开关 l 侧的所有独立负荷块集合

$$s_1-d, s_2-d, \dots, s_g-d$$



联络开关可替代关系分析

分析联络开关 $d(kl)$ 两侧的负荷链路径可替代关系

$$L^{i-k-l,*}$$

先后经过“ $i-k-l$ ”的联络开关 k 侧负荷链

+

$$L^{j-l-k,*}$$

先后经过“ $j-l-k$ ”的联络开关 l 侧负荷链

联络开关 d 可被其余联络开关完全替代的充分必要条件: 两侧负荷链路均被完全包含

$$\begin{cases} L^{i-k-l,*} \subset L^{i-c,*}, \exists c \in \Omega_{sw}, \forall i \in \Omega_S \\ L^{j-l-k,*} \subset L^{j-c,*}, \exists c \in \Omega_{sw}, \forall j \in \Omega_S \end{cases}$$

联络开关 d 综合重要度

$$IMP^d = \sigma \cdot LR^d, \sigma = 0/1$$

$\sigma = 0/1$

联络开关 d 可被其余联络开关完全替代

联络开关 d 不可被其余联络开关完全替代

LR^d 联络开关 d 综合负荷恢复能力

$IMP^d = 0$ 冗余开关, 可被完全替代

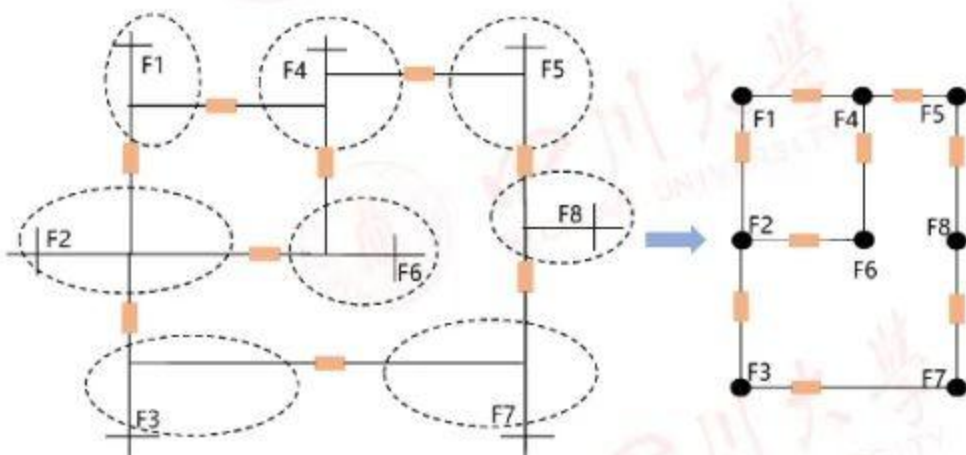
$IMP^d \neq 0$

非关键联络开关, 不可被完全替代

关键联络开关, 不可被完全替代

➤ 复杂配电网聚类分组

● 考虑联络开关重要度的馈线分组方法



第一阶段后，进一步针对馈线条数 ≥ 4 的馈线组展开二次分组：

馈线聚类 → K-means等距离驱动聚类方法难以胜任 → 基于开关重要度的馈线启发式聚类分组

聚类思想

对于负荷恢复重要度较高的联络开关应当被优先保留(即作为连接组内馈线的边)，而低重要度开关应当被优先删去(即作为组间联络边)

聚类指导原则

➤ 两阶段馈线分组方法流程(无需多轮迭代)

阶段2：馈线启发式聚类分组方法

s1. 构建阶段1所得的馈线组为广义图模型 $G(V, E, W)$ ， V 为馈线集合， E 为联络开关集合， W 为联络开关重要度。设置初始聚类 $C = \emptyset$ ；

s2. 将组内联络开关 e 按照重要度从高到底排序，形成 e_{sorted} ；

s3. 对于 e_{sorted} 中的每条联络开关 $e = (v_i, v_j)$ ，执行如下步骤：

s3.a. 对于当前联络开关 e 的两个节点 (v_i, v_j) ，查找 C 中包含 v_i 的聚类 C_i 和包含 v_j 的聚类 C_j ；

s3.b. 若 (v_i, v_j) 在同一个聚类中，则跳过当前联络开关，判定下一条，即：

(1)若 (v_i, v_j) 均未被分配到任意一个聚类，则创建新的馈线聚类 (v_i, v_j) 并加入到 C 中，即：

(2)若 (v_i, v_j) 中的一条馈线属于某个聚类而另一条馈线不属于任何聚类，如 $C_i \neq \emptyset, C_j = \emptyset$ ，且馈线组 C_i 内少于4条馈线，则将馈线 v_j 加入 C_i ；

(3)若 (v_i, v_j) 的两条馈线属于不同的聚类馈线组 $C_i \neq C_j$ ，且合并后的组内馈线数仍旧少于4，则合并 C_i 与 C_j 为一个馈线组。

s4. 将剩余零散馈线划入就近的馈线组中，并输出各馈线组的最终结果

复杂配电网

阶段1：基于规则的馈线分组

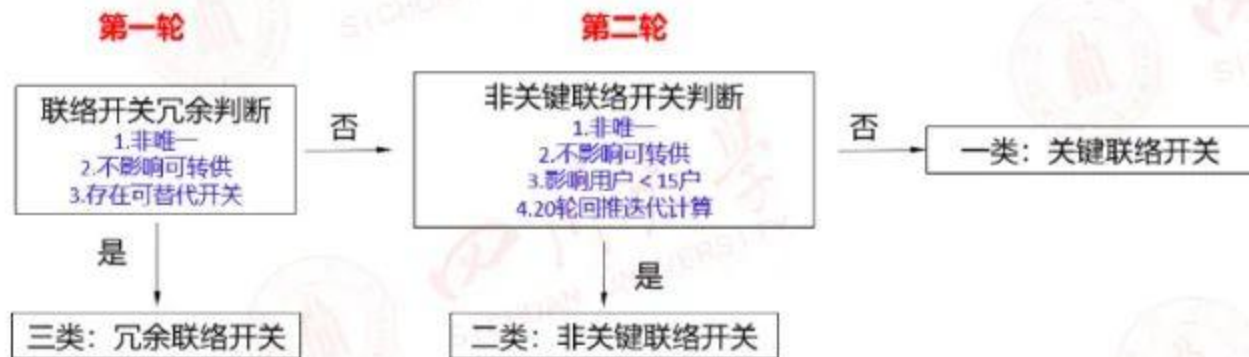
初步馈线组集合(存在较多回数 ≥ 4 的馈线组)

阶段2：馈线启发式聚类分组方法

最终馈线组集合(仅有极少回数 ≥ 4 的馈线组)

分层分布式协同重构运行架构

- 第一轮优化，三类联络即冗余联络缺省，不会导致可靠性的降低；第二轮优化，二类联络即非关键联络缺省，在特定位置发生故障可能会导致可靠性降低的情况。



联络开关重要度分析判断流程



负荷链：指站开关与联络开关形成的供电路径，负荷链数等于联络开关数。

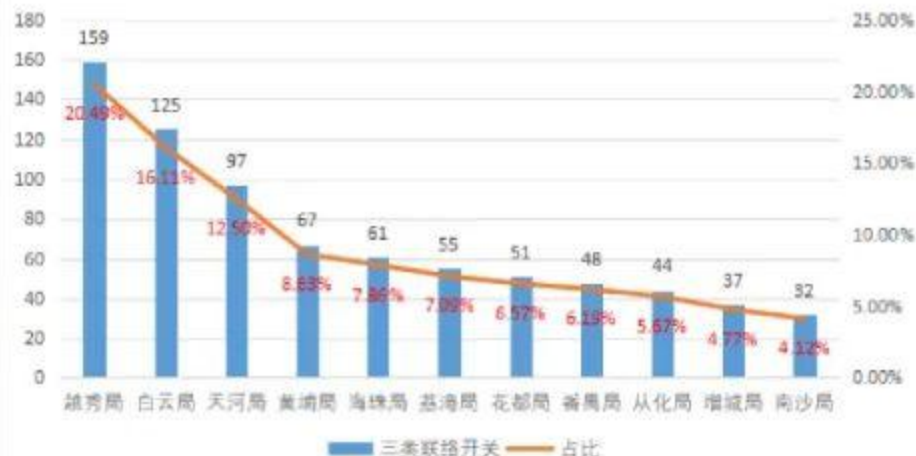
负荷块：指两个及以上开关之间形成负荷区块，其大小通过区块内的中压用户数表征。

独立负荷块：指有且仅有一条负荷链经过的开关所覆盖的负荷区块。独立负荷块的大小，反应在特定区段发生故障该联络开关的作用大小。

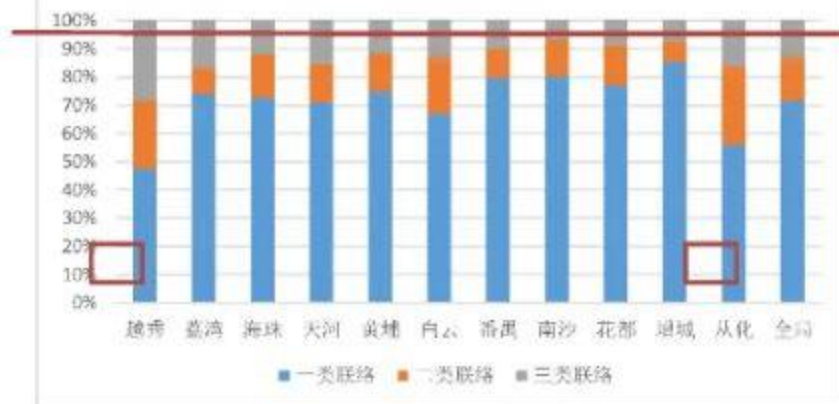
(一) 联络开关分类情况

- **整体情况**：对全局5971个联络开关进行冗余度、重要度分析：一类联络（关键联络）**4278个（占比72%）**，二类联络（非关键联络）**917个（占比15%）**，三类联络（冗余联络）**776个（占比13%）**。
- **三类联络（冗余联络）分布情况**：主要分布在**越秀159个（占比全局20%）**、**白云125个（占比全局16%）**、**天河97个（占比全局13%）**。
- **二类联络（非关键联络）分布情况**：主要分布在**白云191个（占比全局21%）**、**越秀136个（占比全局15%）**、**番禺91个（占比全局10%）**。

各区局三类联络开关分布情况



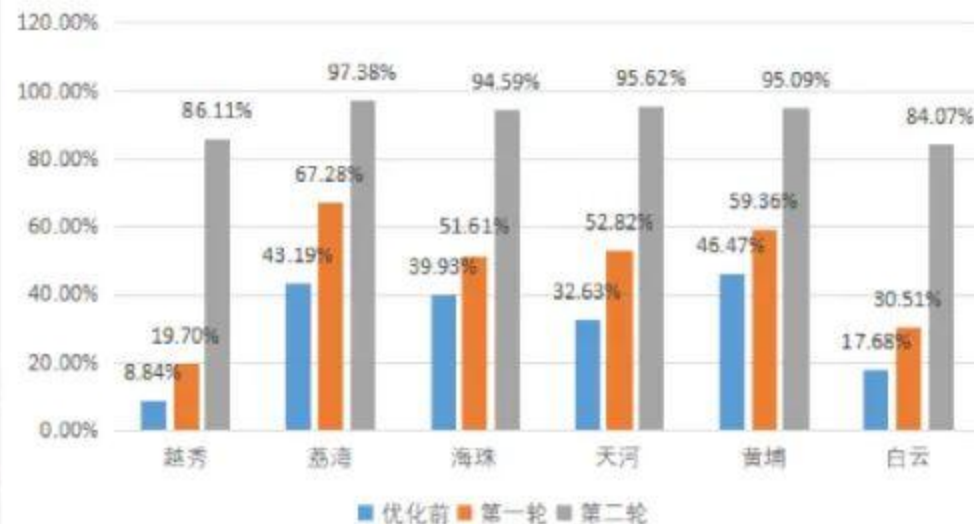
各区局联络分布占比情况



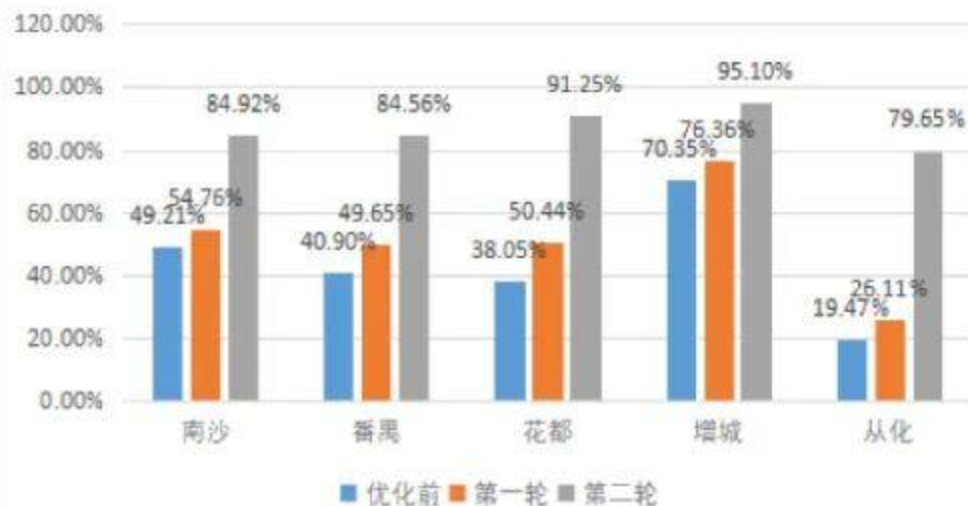
(二) 馈线组划分情况

- 各区局联络关系优化前后情况对比：经第一轮优化后，城区局提升幅度较大，如荔湾局满足要求占比由**43%提升到67%**；郊区局由于冗余联络较少，提升幅度较小，如从化、南沙、番禺、增城提升幅度均低于10%；经第二轮优化后，全局提升效果均较为明显，优化后满足要求占比**超过90%**的区局有**6个**，其中荔湾、天河、黄埔、增城满足要求占比超过**95%**。

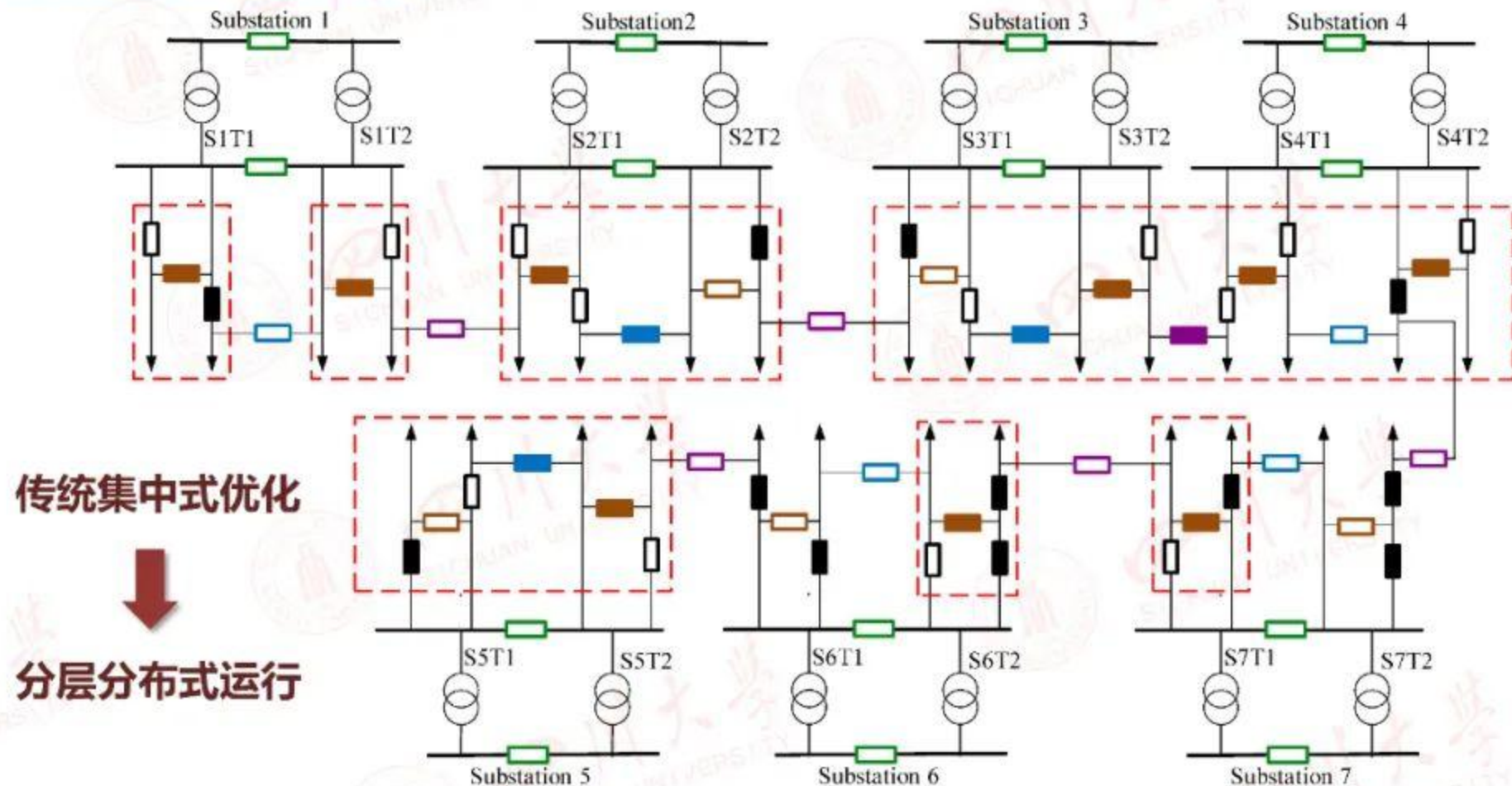
城区局



郊区局

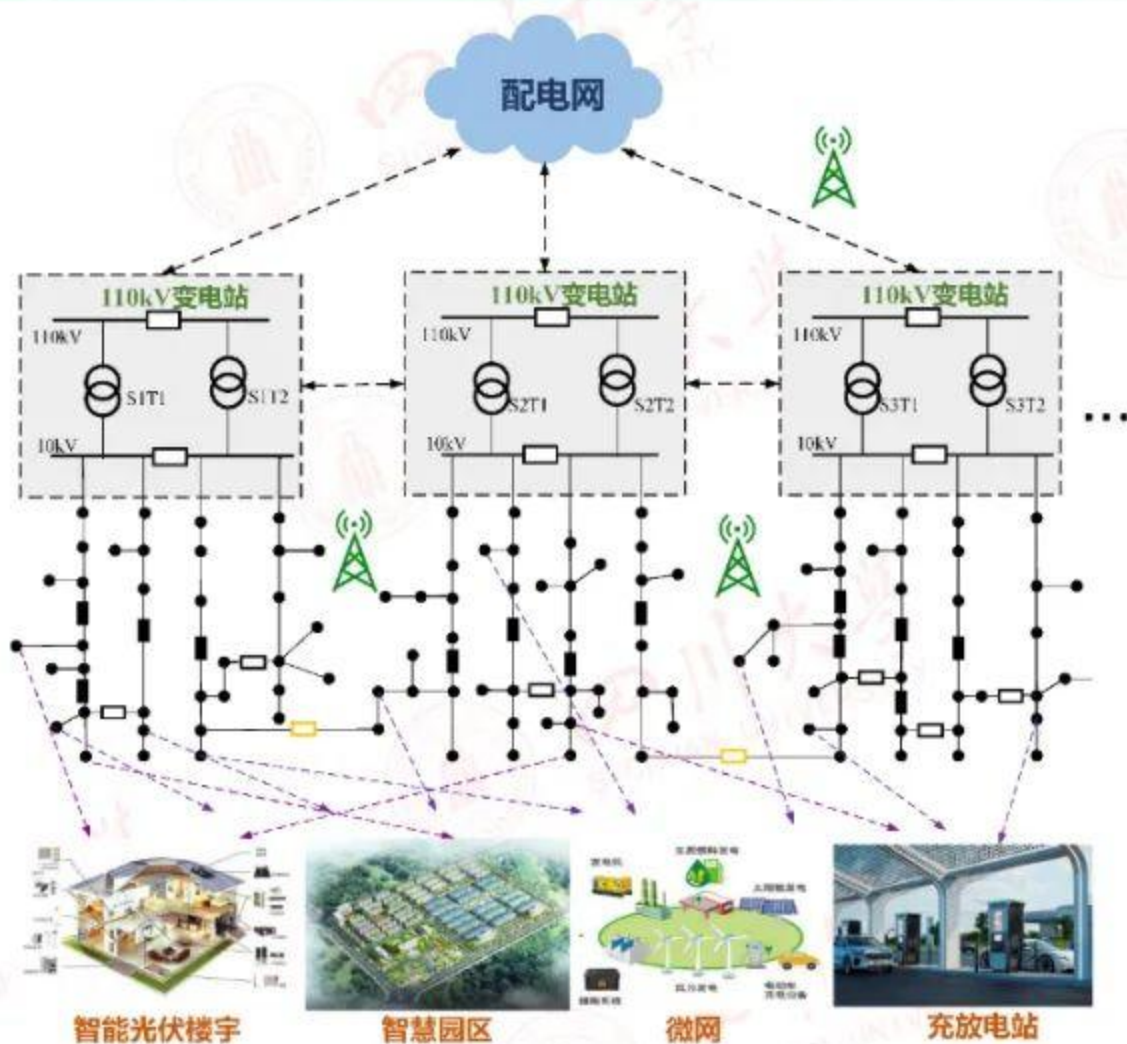


➤ 分层分布式重构运行框架



- 研究背景
- 分层分布式协同重构运行架构
- 重过载自愈运行方式主动控制
- 故障自愈分布式高效复电控制

重过载自愈运行方式主动控制



云中心(云)

职责



- 调度方案自趋优进化学习
- 不平衡工况下的全局协调
- 边缘侧调度方案趋优引导

边缘侧(边)

职责



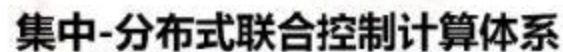
- 各区域内数据收集与挖掘
- 变电站内部资源自治响应
- 参与其它边缘侧互济平衡

末端用户(端)

职责



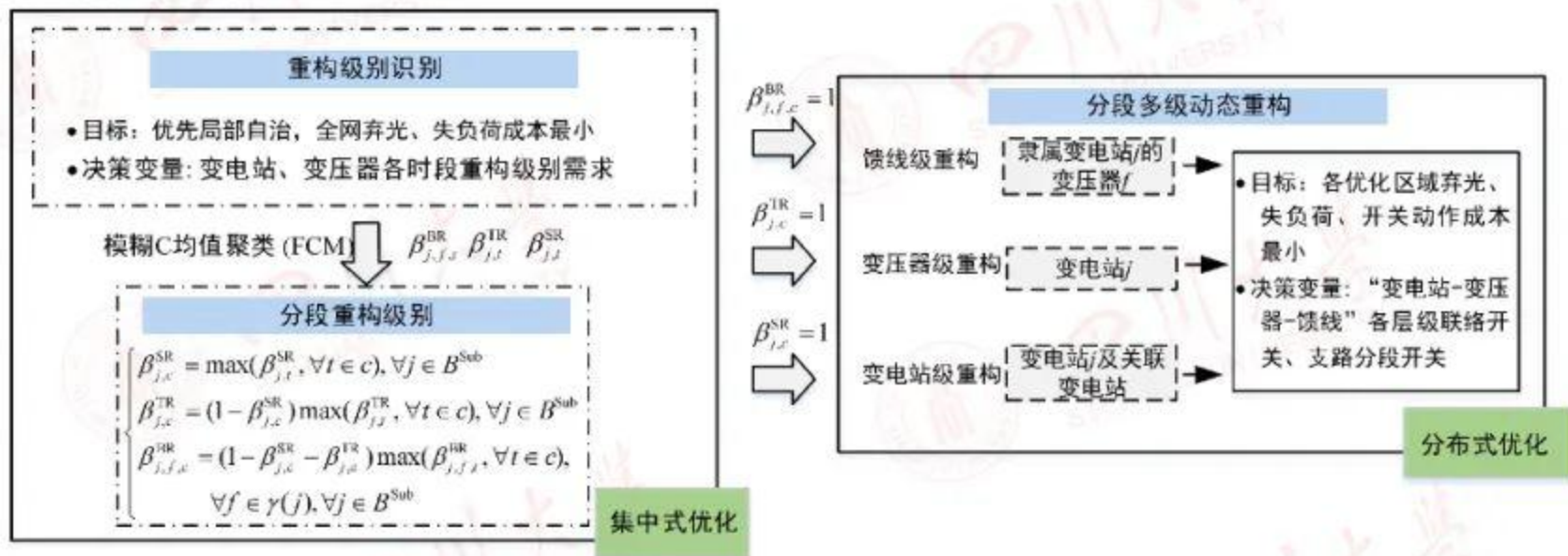
- 根据价格等制定自身策略
- 参与边缘侧柔性互动响应
- 实现与边缘侧的互动协同



-

- ✓ 边缘节点通过主干通信网络将净负荷预测数据上传至云端数据中心，云端完成重构级别识别，将多级重构级别需求转化为集中控制命令；
- ✓ 分段馈线级重构、变压器级重构由对应站点边缘计算控制平台执行，开关动作方案转化为控制命令对开关进行远程控制。

➤ 云边协同运行控制技术



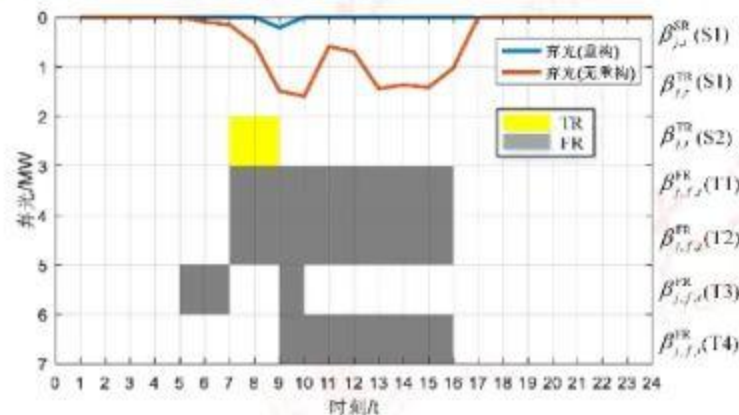
- ◆ **重构级别识别:** 考虑多变电站的强耦合关系, 级别识别需同时计及系统内各层级净负荷转移需求, 表现为**集中式优化**
- ◆ **分段多级重构:** 基于重构级别识别结果, 全网络被划分为多个子网络, 可单独进行分段重构方案制定, 表现为**分布式优化**

集中-分布式
优化需求

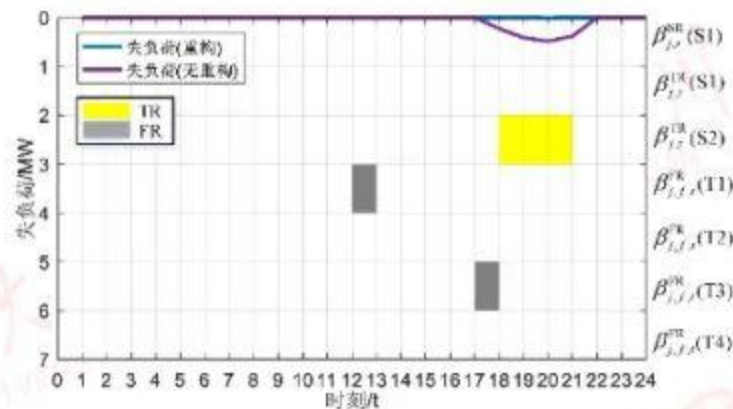


- 在各变电站设置**边缘节点**, 完成具体重构方案计算, 可以有效减小云端的集中计算能耗
- 基于**云边协同**的多级重构, 其**集中-分布式联合控制**计算体系能够适应配电网规模化发展及分布式能源高比例集成

➤ 重构级别快速识别

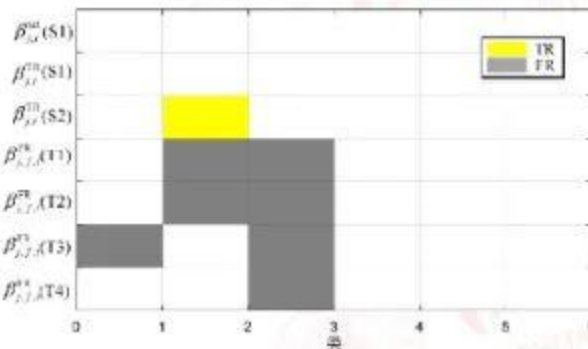


场景①24时段级别评估结果

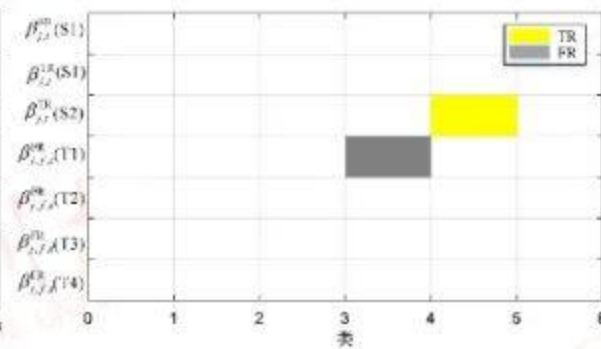


场景②24时段级别评估结果

场景①



场景②



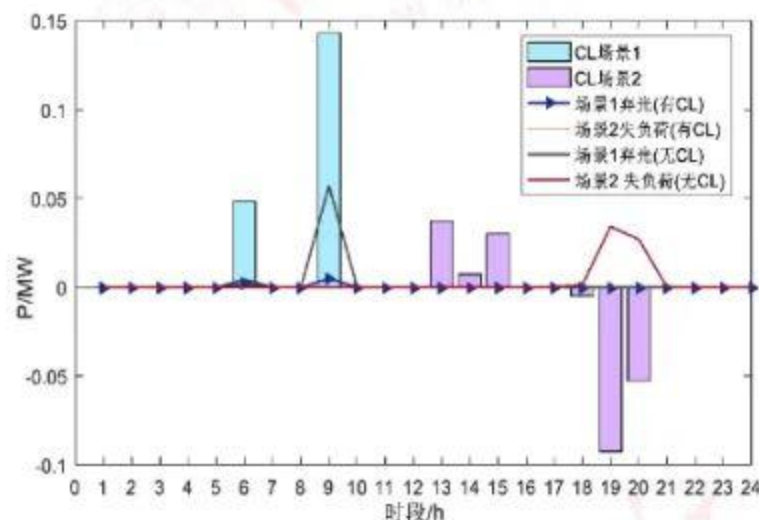
分段多级重构级别

建立的重构级别识别双层模型能够准确识别偏好低层级重构下的“馈线-变压器-变电站”多级重构需求。

优先局部自治，滞后全局协调



云边协同运行控制



两阶段优化运行策略通过第一阶段**分段多级重构**和第二阶段**CL协调优化**能够显著减小弃光、失负荷水平。

重构方法	求解方法	求解时间
全局动态重构	Cplex	Infeasible
全局动态重构	BPSO	>12h
集中式分段多级重构	Cplex	298.0468s
分段多级云边协同运行控制	Cplex	64.2974s

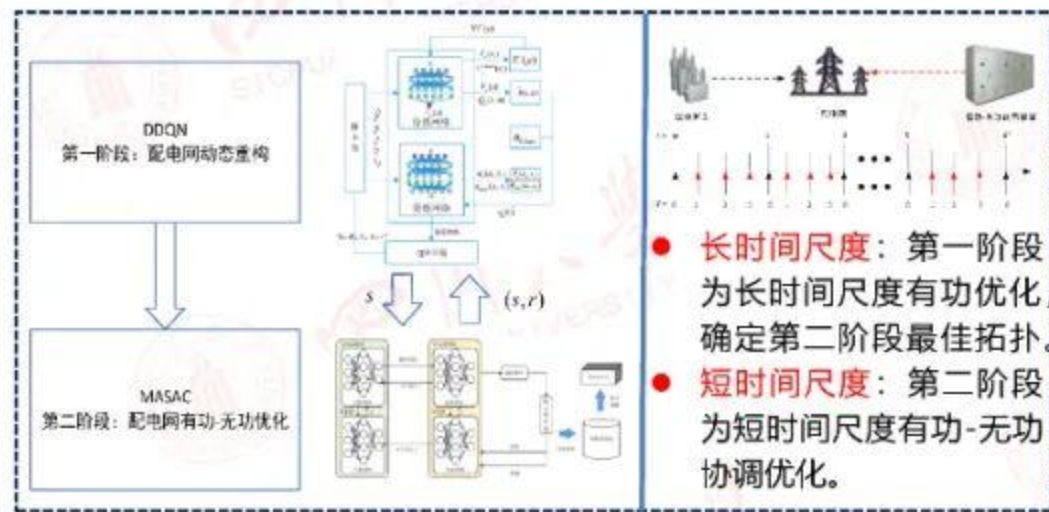
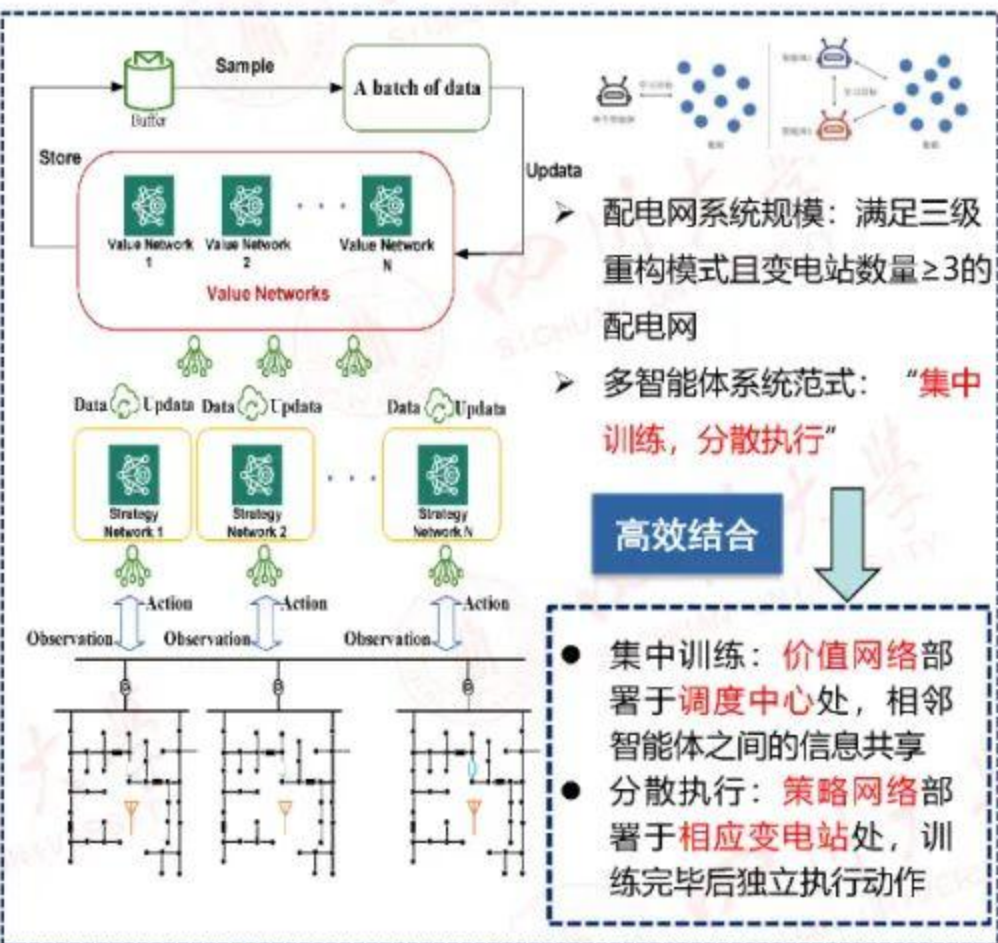


C	第一阶段			第二阶段	
	时间/s	调节次数	开关成本/\$	CL成本/\$	弃光成本/\$
4	158.4870	20	1050	2.9836	37.2464
5	46.8720	20	1050	7.5754	3.3601
6	45.6857	20	1050	7.5754	3.3601
7	35.3270	22	1150	14.3639	13.6843
8	76.1763	28	1400	9.3538	117.3771

分层自治重构运行

相比采用Cplex或二进制粒子群算法求解的全局动态重构模型，提出的云边协同运行控制方法基于**集中-分布式联合优化框架**，在配网各层建立边缘计算组服务**分段多级重构**策略，能够显著降低求解难度、大幅度缩短重构求解时间，实现了配电网分层自治运行。

基于多智能体深度强化学习的多级动态重构决策方法



- **长时间尺度:** 第一阶段为长时间尺度有功优化, 确定第二阶段最佳拓扑。
- **短时间尺度:** 第二阶段为短时间尺度有功-无功协调优化。

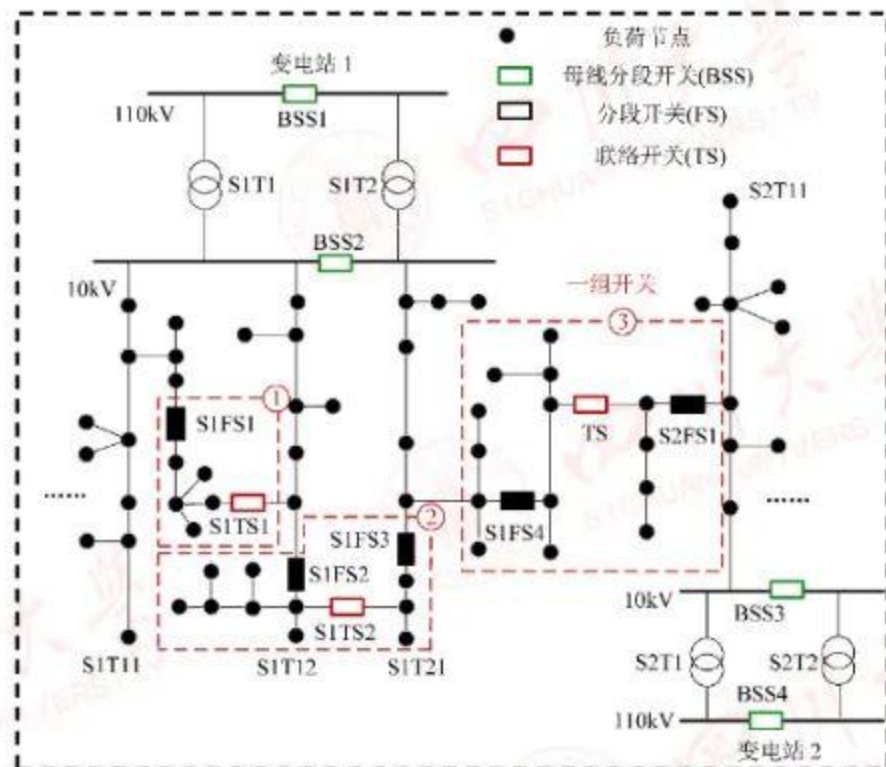
- 第一阶段智能体执行**离散动作**任务, 选用DDQN算法
- 为实现两阶段优化的**耦合**, 智能体**奖励函数**的有功部分接收第二阶段的**反馈**

- 第二阶段智能体执行**连续动作**任务, 选用MASAC算法
- 为实现两阶段优化的**耦合**, 智能体**状态空间**加入第一阶段智能体的**动作**

基于多智能体深度强化学习与云边协同的配电网重构运行

大规模配电网重构

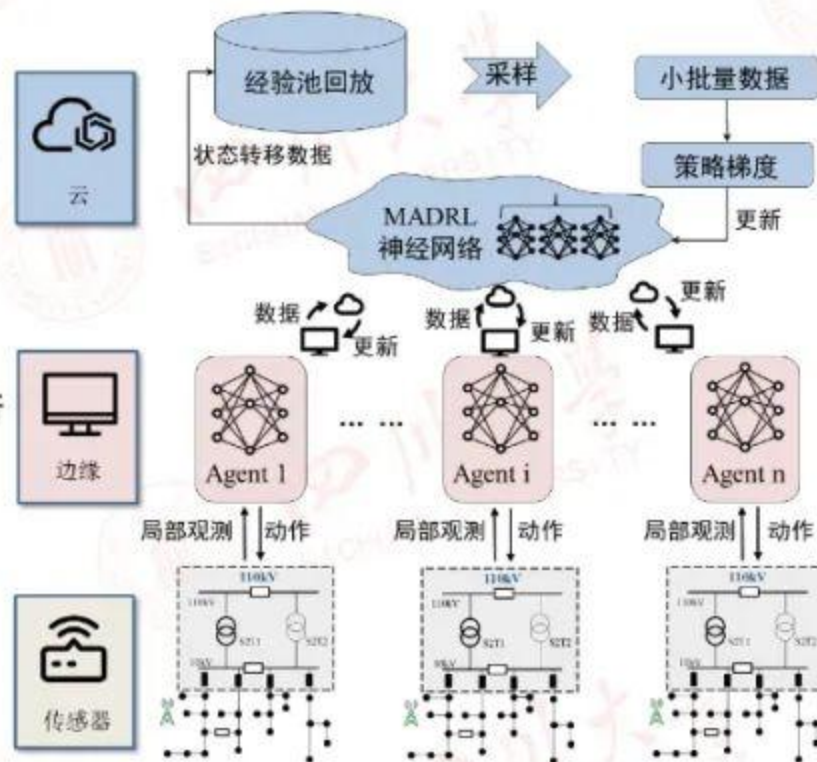
多个子配电网相互影响 DG和负荷动态变化 没有精确的物理模型



数据驱动?
深度强化学习?
耗时的训练过程
高延时集中式执行

基于MADRL与云边协同的配电网重构框架

低计算成本 全局决策能力 低时延



- 研究背景
- 分层分布式协同重构运行架构
- 重过载自愈运行方式主动控制
- 故障自愈分布式高效复电控制

基于云平台高效赋能机器学习的典型故障研判与负荷最优自愈恢复路径规则库

针对传统集中式自愈在处理故障的速度和效率方面面临着日益严重的性能瓶颈，通过**I-Relief特征筛选算法**对故障数据特征库进行降维，训练生成基于机器学习的配电网故障智能研判专家知识库；通过动态降维建模技术对馈线组进行简化，基于**供电恢复量、网损、切负荷量和开关动作次数**等作为目标函数，构建起基于深度学习的配电网负荷最优自愈恢复路径规则库模型；基于云平台分布式计算技术，高效赋能于基于机器学习的**配电网故障智能研判**和**负荷最优自愈恢复**技术，实现对故障处理效率的大幅提升。

基于I-Relief算法的特征筛选方法

1. 输入的样本集和特征集合:

$$D = \{(X_i, y_i)\}_{i=1}^N, i = 1, 2, \dots, N$$
$$A = \{a(j)\}_{j=1}^I, j = 1, 2, \dots, I$$

2. 各个特征权重计算:

$$diff(g, X_i, H_i) = \sum_{j=1}^k \frac{|X_{ig} - X_{ig}^{NH_j}|}{\max_{t=1, \dots, N} \{X_{it}\} - \min_{t=1, \dots, N} \{X_{it}\}}$$

$$diff(g, X_i, M_i) = \sum_{j=1}^k \frac{|X_{ig} - X_{ig}^{NM_j}|}{\max_{t=1, \dots, N} \{X_{it}\} - \min_{t=1, \dots, N} \{X_{it}\}}$$

3. 更新特征权重:

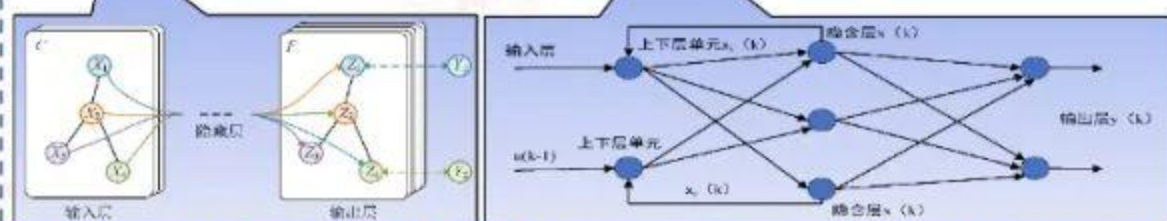
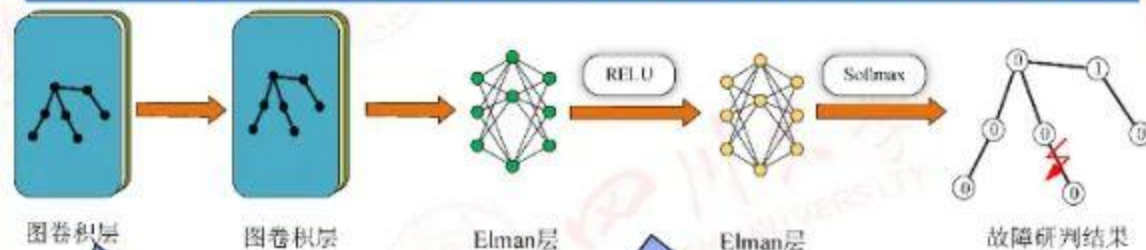
$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \omega^T \beta_i \\ s.t. \|\omega\|_2 = 1, \omega \geq 0 \end{array} \right.$$

各种历史故障事件数据集

数据支撑

数据支撑

基于图神经网络与Elman神经网络的配电网故障智能研判专家知识库模型



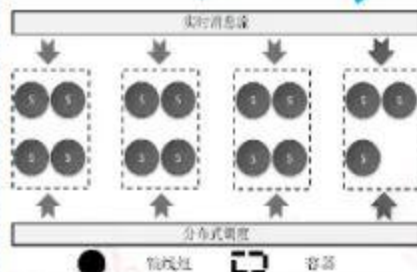
基于云平台高效赋能机器学习的典型故障研判与负荷最优自愈恢复路径规则库

分布式并行处理的云平台架构

配电网降维解耦

- 分析馈线之间的拓扑连接关系, 突破配网联络关系复杂困境。
- 将配网拆分为若干个互不相连的子网络, 实现网络规模动态降维处理。

动态降维 并行计算 云平台支撑



分布式并行计算

- 将馈线组分配至多个自愈容器中, 进行自愈任务**集群化动态并行部署和调度**。

云平台算力提升

- 应用云平台**分布式并行处理**, 提升配电网负荷最优自愈恢复效率。

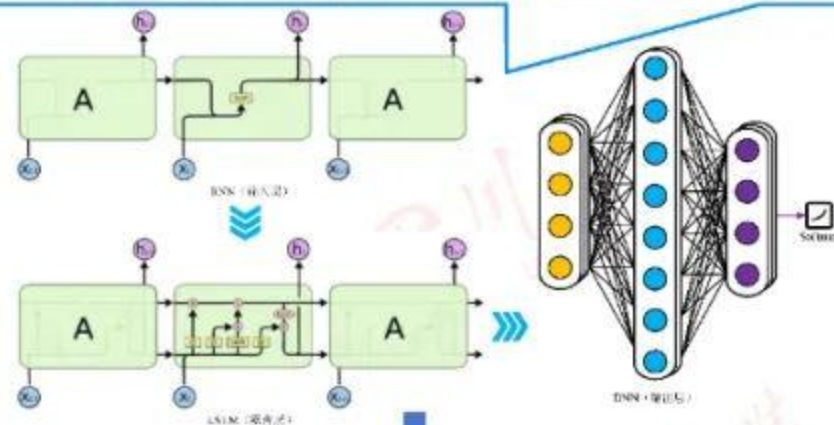
基于深度学习的配电网负荷最优自愈恢复路径规则库模型

目标函数

供电恢复量: $\max(F(L)) = \sum_{k=1}^J L_k \times y_k$ 系统网损: $\min(\Delta P) = \sum_{r=1}^h I_r^2 \times R_r$

开关动作次数: $\min(F(C, D)) = \sum_{i=1}^m (1 - C_i) + \sum_{j=1}^n D_j$ 切负荷量: $\min(Q_f) = \sum_{q=1}^l Q_q$

节点电压 支路电流 有功功率 无功功率 系统频率



电网状态



恢复策略



故障类型

➤ 基于事件化专家库高容错匹配关联的故障智能研判方法

针对超大型城市配电网**非健全信息**环境下故障研判**容错性低**的问题，提出基于健全信息的配电网故障事件化仿真模拟技术，形成信息不健全下的**事件化专家库**。建立基于**KMP算法**的配电网故障信息校验方法，以验证信息的完整性。构建适应非完备信息环境的配电网**故障高容错模糊匹配**方法，引入了故障关键特征信息驱动与特征-故障关联挖掘为基础的**模糊集理论与神经网络**相结合，从而实现非健全信息环境下配电网故障准确研判。

配电网故障特征分析与多源信息处理方法

配电网多源故障信息

故障指示器
信号

断路器动作
信号

配变失电
信号

开关动作
信号

不同故障类型信息
特征分析

K-Means
数据预处理

配电网拓扑数据

单馈线

树状网

多馈线

配电网故障信息节点网络

配变合并节点

开关/断路器节点

故障指示器节点

● 变电站节点
● 配变合并节点
■ 开关/断路器节点
● 故障指示器节点

基于事件化专家库高容错匹配关联的故障智能研判方法

信息健全下的配电网事件化专家库生成

基于深度优先的配电网路径搜索算法

$$\Gamma_i = \{L_1^i, L_2^i, \dots, L_N^i\}$$

识别故障监测设备上下游关系

元件编号	上游元件	下游元件	元件状态信息
1	0	2	1
2	1	3、4	1

基本故障事件专家库

故障区段	信息节点信号特征	故障事件信息
3	[0,1,0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1]	故障发生在区段3, 该路段位于10kV牛磺线03#杆与10kV牛磺线08#杆之间
5	[0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1]	故障发生在区段5, 该路段位于10kV牛磺线11#杆与10kV牛磺线24#杆之间

信息不健全下的配电网事件化专家库生成

故障信号特征集生成

$$u^{New} = random(0, L, \max(u^{Old}))$$

$$similarity = \omega^{FTU} SR^{FTU} + \omega^{trans} SR^{trans}$$

$$SR^{FTU} = \begin{cases} \frac{1}{N^{FTU}}, & x_i = y_i > 0 \\ \frac{1-\alpha}{N^{FTU}}, & x_i = y_i = 0 \\ \frac{\alpha}{N^{FTU}}, & x_i < y_i \\ -10, & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$SR^{trans} = \begin{cases} \frac{x_i}{N^{trans}}, & x_i = y_i > 0 \\ \frac{(1-\beta)x_i}{N^{trans}}, & x_i = y_i = 0 \\ \frac{\beta y_i}{N^{trans}}, & x_i < y_i \\ -10, & \text{otherwise} \end{cases}$$

相似度函数

涵盖信息不健全各种情况下的事件化专家库

模型支撑

高容错模糊匹配的配电网故障研判技术

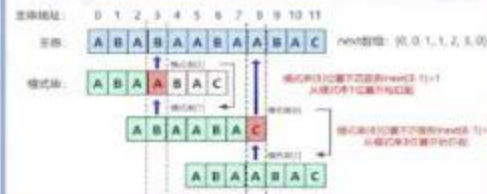
配电网多源不完全故障信息

信息健全

专家库匹配

健全/非健全信息环境下配电网故障区段定位结果

KMP数据校验方法



信息不健全

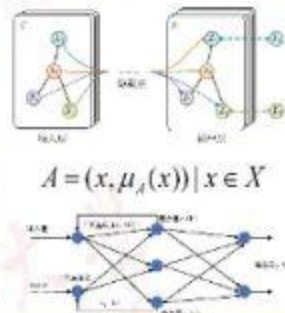
高容错配电网故障判别方法

图神经网络

+

Elman网络

模糊集



➤ 基于故障事件预学习与邻域线/组转供能力耦合的故障自愈紧急复电控制智能化在线决策

针对超大型城市配电网故障自愈紧急复电控制方法，通过**Random Cost-CNN**构建故障事件的预学习模型。建立基于**深度强化学习**的配电网邻域线/组内负荷转供模型，基于实时监测数据和转供能力分析结果，设计快速准确地制定紧急复电控制策略。结合**抢修任务快速生成分发和语音智能管控技术研究**，打造基于**MPP（大规模并行处理）架构**的数据底座，提高供电可靠性。

故障事件预学习与数据采集

1. 历史数据分析与故障模式识别:

$$S_{SE} = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} |d(x, C_i)|^2$$

2. 分析聚类结果，利用生成GAN模型对少数类各子类进行数据生成:

$$\min_G \max_D V(D, G) = E_{x \sim P_{data}(x)} [\log D(x)] \\ + E_{z \sim P_z(z)} [\log(1 - D(G(z)))]$$

$$\begin{cases} \max_D V(D, G) = -(1-y) [\log(1 - D(G(z)))] + y \log D(x) \\ \min_G V(D, G) = (1-y) [\log(1 - D(G(z)))] \end{cases}$$

3. 数据集合并

各种历史故障事件数据集

数据支撑

数据支撑

故障事件预测模型建立

数据获取
清理

数据分析

数据特征
提取

故障数据集
构建

模型训练与
优化

搭建Random Cost-
CNN分类模型

应用K-means-
GAN扩充数据集

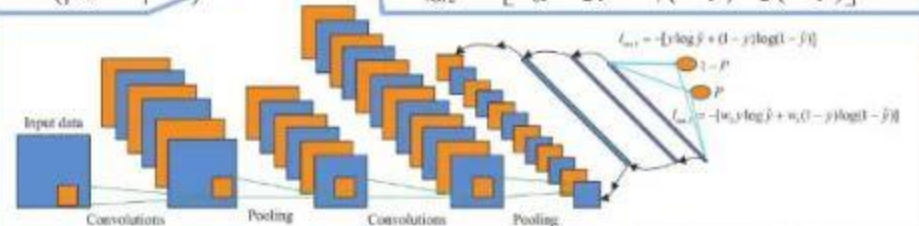
$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{\mu_n}{n} - p\right| < \varepsilon\right) = 1$$

$$l_{loss1} = -[y \log \hat{y} + (1-y) \log(1-\hat{y})]$$

$$l_{loss2} = -[w_o y \log \hat{y} + w_i (1-y) \log(1-\hat{y})]$$

$$l_{loss} = -[y \log \hat{y} + (1-y) \log(1-\hat{y})]$$

$$l_{loss} = -[w_o y \log \hat{y} + w_i (1-y) \log(1-\hat{y})]$$



基于故障事件预学习与邻域线/组转供能力耦合的故障自愈紧急复电控制智能化在线决策

超大型城市配电网邻域线/组转供能力分析

两回一组/三回一组/四回一组的馈线组典型/非典型接线范式

基于深度强化学习的配电网
邻域线/组内负荷转供模型

基于Dueling-DQN算法的
智能体

$$S = [V, I, SW, F]$$

$$Q(S, A, \omega, \alpha, \beta) = V(S, \omega, \alpha)$$

$$R_i = \sum_{k=1}^{N_{op}} P_{ro,k} \quad P_{Act} = \begin{cases} P_A, A_k \in O_A \\ 0, A_k \notin O_A \end{cases}$$

$$+ \left[A(S, A, \omega, \beta) - \frac{1}{|A|} \sum_{a' \in A} A(S, a', \omega, \beta) \right]$$

开关动作A

基于Dueling DQN算法
的智能体

估计网络

目标网络

经验池R

超大型配电网联络开关、
分段开关

电压V、电流I、开关状态
SW、故障状态F

状态S

约束条件

重构约束、潮流约束、
安全约束

目标函数

失负荷、重构开关动作
次数、网络损耗

奖励Reward

模型
支撑

故障自愈紧急复电控制方法

① 多任务并行处理的任务分发方法

约束 调度 同步

② 无共享模式下的并行处理数据架构

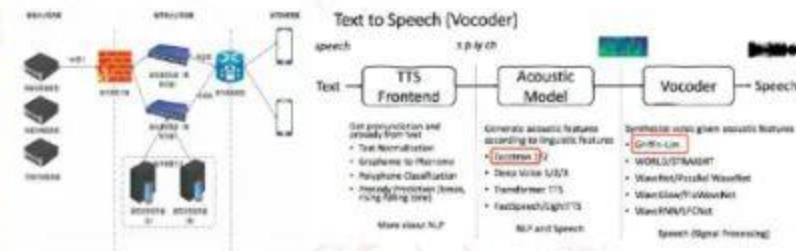
基于GP的分布式
数据库的MPP数
据库架构



③ 基于协同自动化的业务深度触达方法

④ 基于语音融合网关的信号转换方法

⑤ 基于语音合成技术的智能协同方案



➤ 面向区段/主变多层级多场景故障应用的超大型城市配电网自愈系统

系统可以在不同的场景下自动识别和处理区段或主变出现的故障，从而最大程度地减少停电时间和提高电网的可靠性。在此基础上，充分运用分布式计算环境优势，通过智能化重构和技术创新，大幅提升了系统的自愈能力和运行效率，有效进行**配网拓扑结构简化、故障研判、故障恢复**以及**紧急复电**，从而实现**组内自治-组间协同**的超大型城市配电网故障高效自愈。

超大型城市配电网

数据
支撑

馈线组动态降维

① 馈线拓扑分组：

馈线拓扑联络
情况

实现区域互联配
网模型抽取

实现配网规模降维

进行馈线分组

② 馈线组动态分群：

系统整体规模
+
可用计算资源

数据
支撑

自愈任务的分布
式部署和调度



组内自治-组间协同



提供
拓扑
架构

故障处理

1. 故障研判：① 故障预学习：

分析历史数据
识别故障模式

建立基于**Random-Cost-CNN**分类预测模型

② 故障研判启动条件：

开关跳闸和保护动作信号；故障指示器信号；
配变失电信号（至少满足2台）

③ 故障数据特征库降维：

K-Means算法、**I-Relief**特征筛选算法、
Elman神经网络离线学习机制

2. 故障恢复：—— 最优自愈恢复路径规则库生成：

基于**深度强化学习**

电压电流等
状态信息

进行训练

输出复电方案

部署在**云平台**

3. 紧急复电：

① 任务分发技术： 约束、调度、同步

② 信号转换： 语音融合网关

③ 业务深度触达： 融合通信技术链接信息内网

④ 并行处理数据架构： **MPP**数据库架构

