



国家电网  
STATE GRID

国网湖北省电力有限公司  
STATE GRID HUBEI ELECTRIC POWER CO., LTD.

# 适应高比例分布式电源接入的配 电网保护关键技术研究进展

国网湖北省电力有限公司电力科学研究院

配网技术中心 杨帆

2023年12月

# 目录

TABLE OF CONTENTS

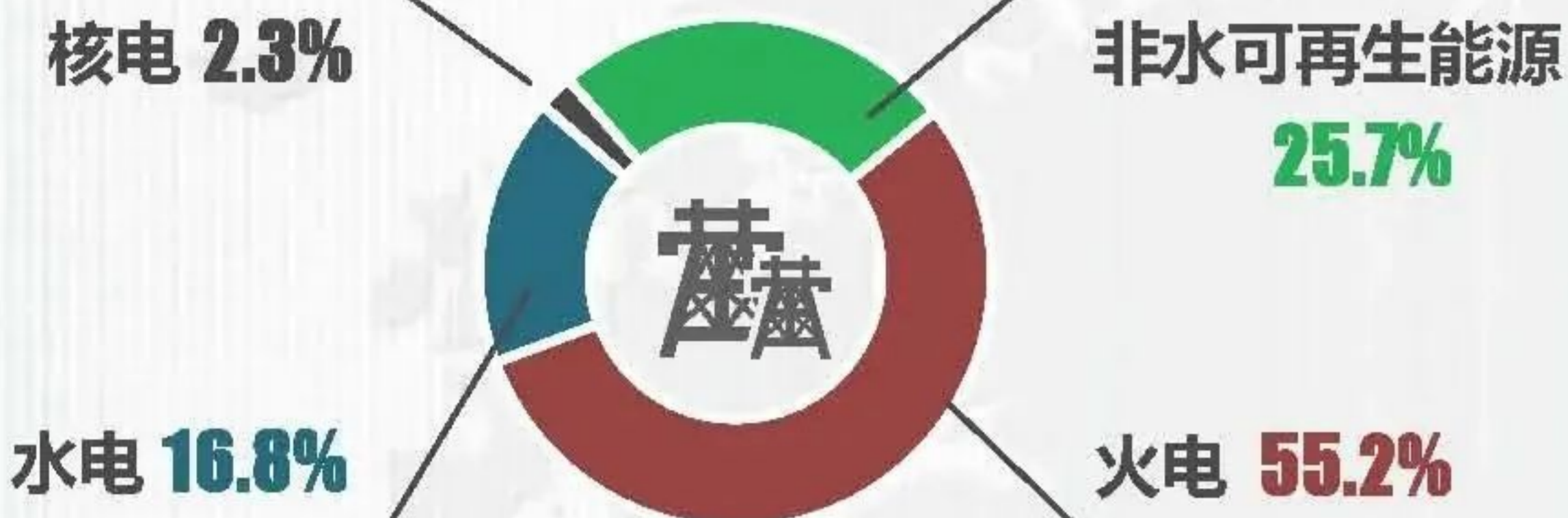
01 背景

02 问题的提出

03 阶段性研究进展

04 小结

中国当前电源  
装机结构



随着“双碳”目标的提出，能源转型不断推进，**高比例新能源接入电力系统已成必然趋势。**

▶ **2030年**

● 新能源成为**第一大电源**

▶ **2060年**

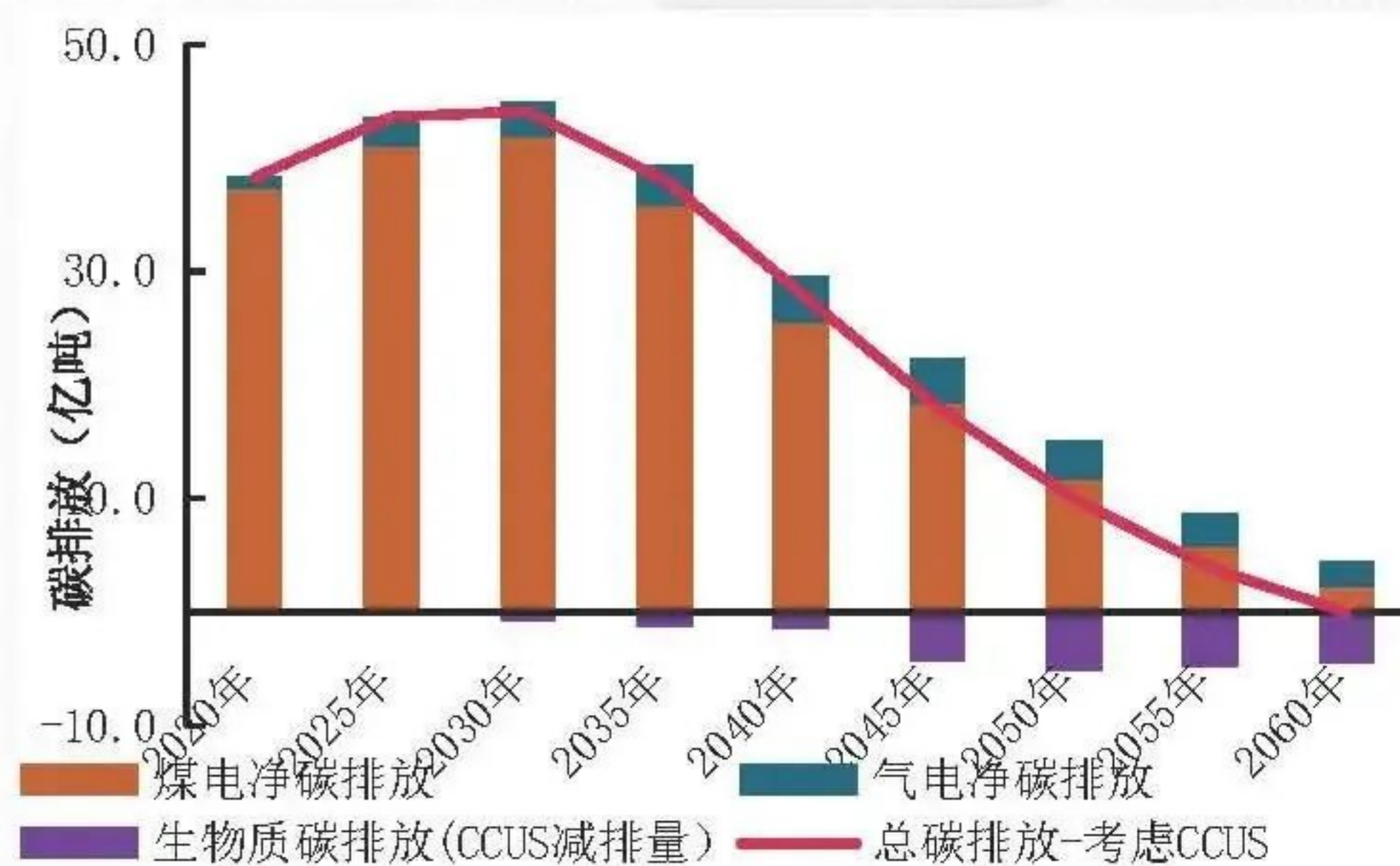
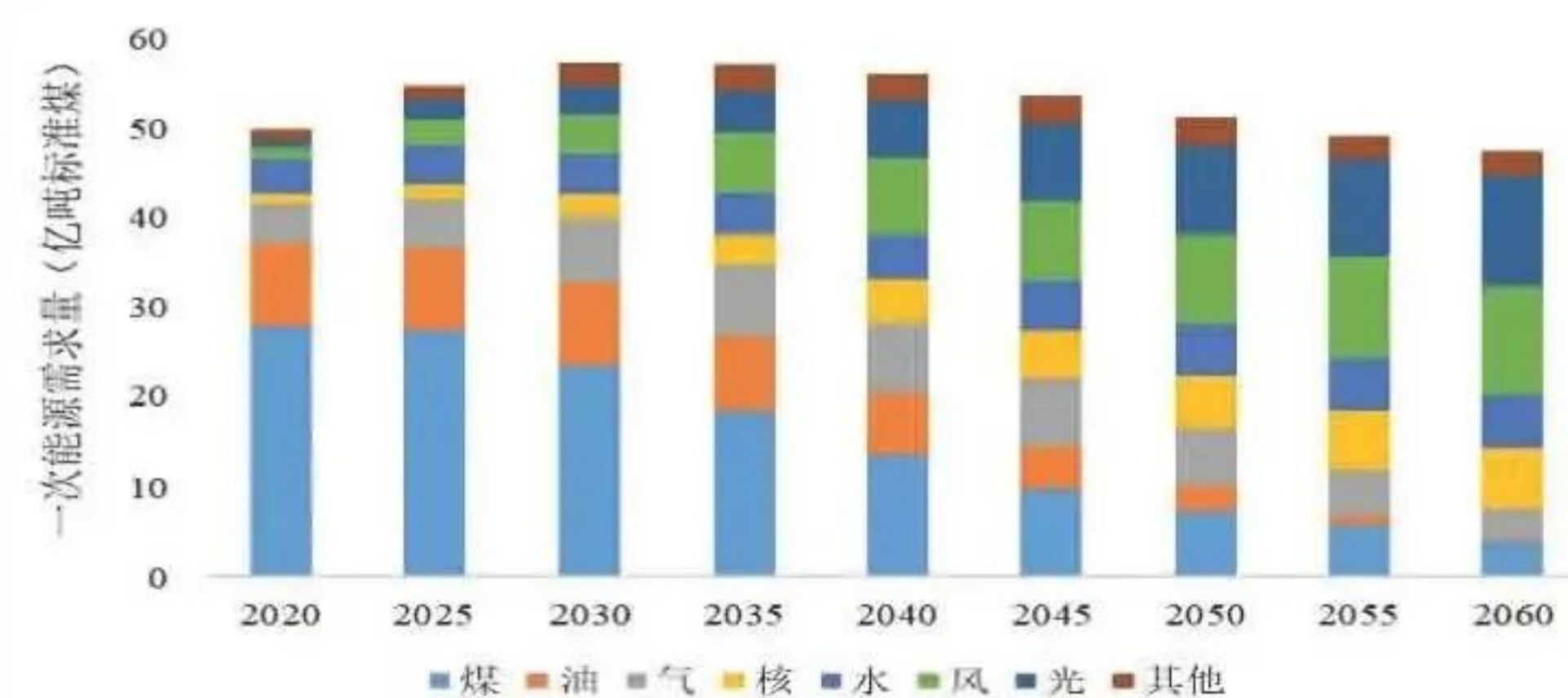
● 新能源成为**电量主体**

## 碳达峰阶段（2021-2030年）

□ 非化石能源占一次能源消费比重达到25%左右，终端能源消费电气化水平将增长到39%左右，风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上。

## 碳中和阶段（2031-2060年）

□ 非化石能源占一次能源消费比重达到80%以上，终端能源消费电气化水平将增长到70%左右，实现能源消费电气化。



## 新型电力系统

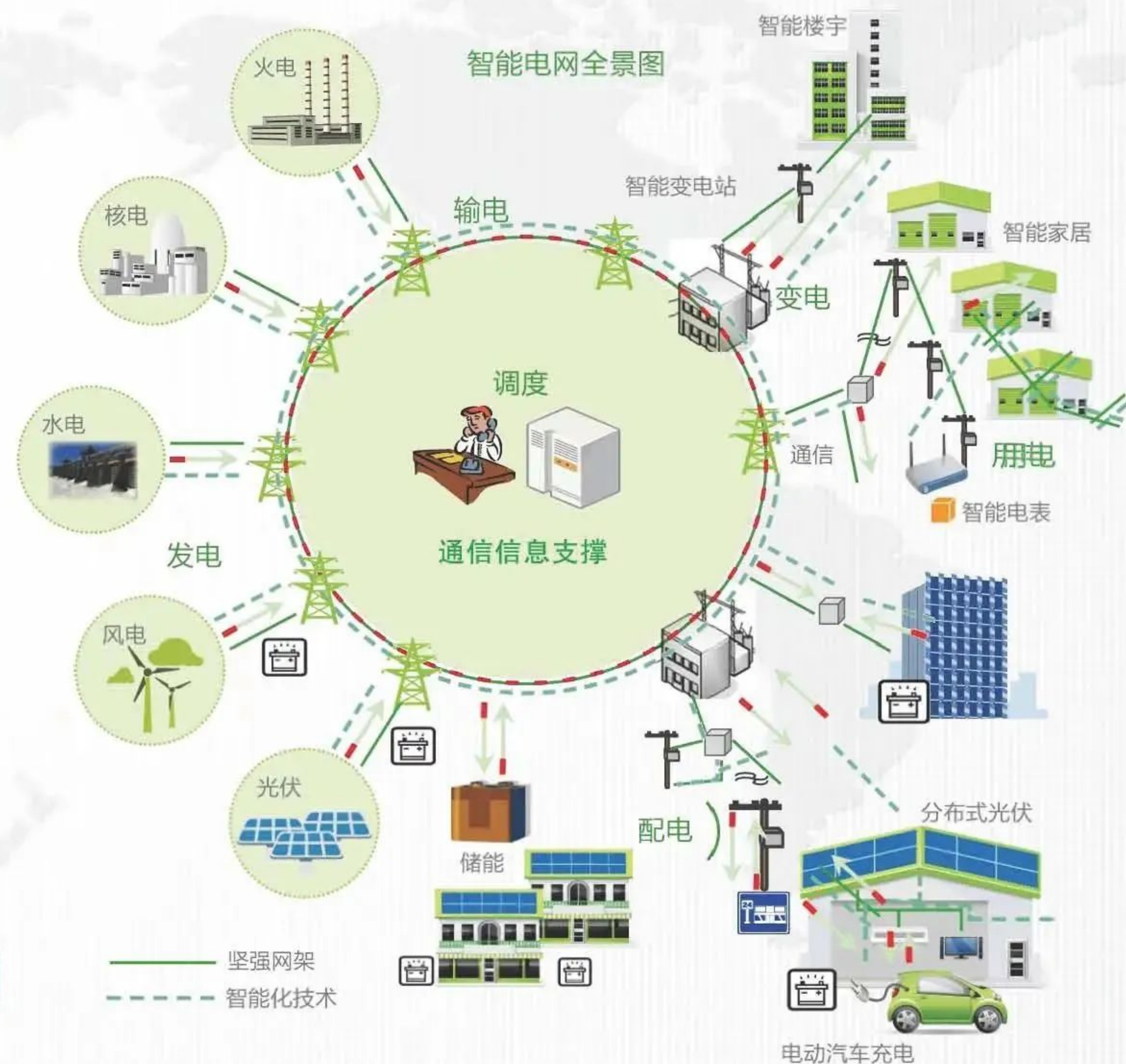
- 以确保能源电力安全为**基本前提**
- 以满足经济社会发展电力需求为**首要目标**
- 以高比例新能源供给消纳体系建设为**主线任务**
- 以坚强、智能、柔性电网为**枢纽平台**
- 技术创新和体制机制创新为**基础保障**

清洁低碳

清洁低碳

柔性灵活

智慧融合





# 背景

## 配电网形态特征发展趋势及保护自愈要求 (1/3)

### 配电网由电能配送网络演化为分布式资源高渗透接入、柔性负荷参与互动的“新型局域电力系统”

在双碳目标及新型电力系统建设驱动下，分布式新能源迅猛发展，储能系统、多元化负荷、综合能源站等新要素不断丰富。配电网由无源网络向有源网络、潮流由单向向双向转变，负荷结构及特性发生变化、源荷边界模糊化，平衡模式、功能形态、结构形态、设备形态、控制形态将发生改变。

组成	现有模式	发展趋势
功能定位	电能配置平台 (电)	资源配置平台 (电、冷、热、气...)
市场主体	单一	多元
构成要素	配电网+常规负荷	分布式电源+配电网+常规负荷+多元化负荷+储能
潮流方向	单向	双向
结构形态	高冗余	低冗余
设备形态	交流配电设备	交直流设备+一二次融合设备+电力电子设备
控制形态	集中式	集中式+分布式

## 配电网形态特征发展趋势及保护自愈要求 (2/3)

**不同比例分布式电源接入后，配电网的保护各侧将面临适应性问题，需统筹考虑构建一体化方案**

分布式电源接入后将改变传统配电网故障时的电气量特征，线路侧：接入位置的不同会对短路电流产生助增与助减作用，传统保护整定需评估影响后进行调整，防止误动与拒动；DER侧：在系统扰动时可提供主动支撑，在线路故障或非计划孤岛时，被有选择性的快速可靠切除。

DER



01

□ 在系统**扰动时**穿越运行，提供主动**支撑**

02

□ 在线路**故障时**，被有选择地快速**切除**

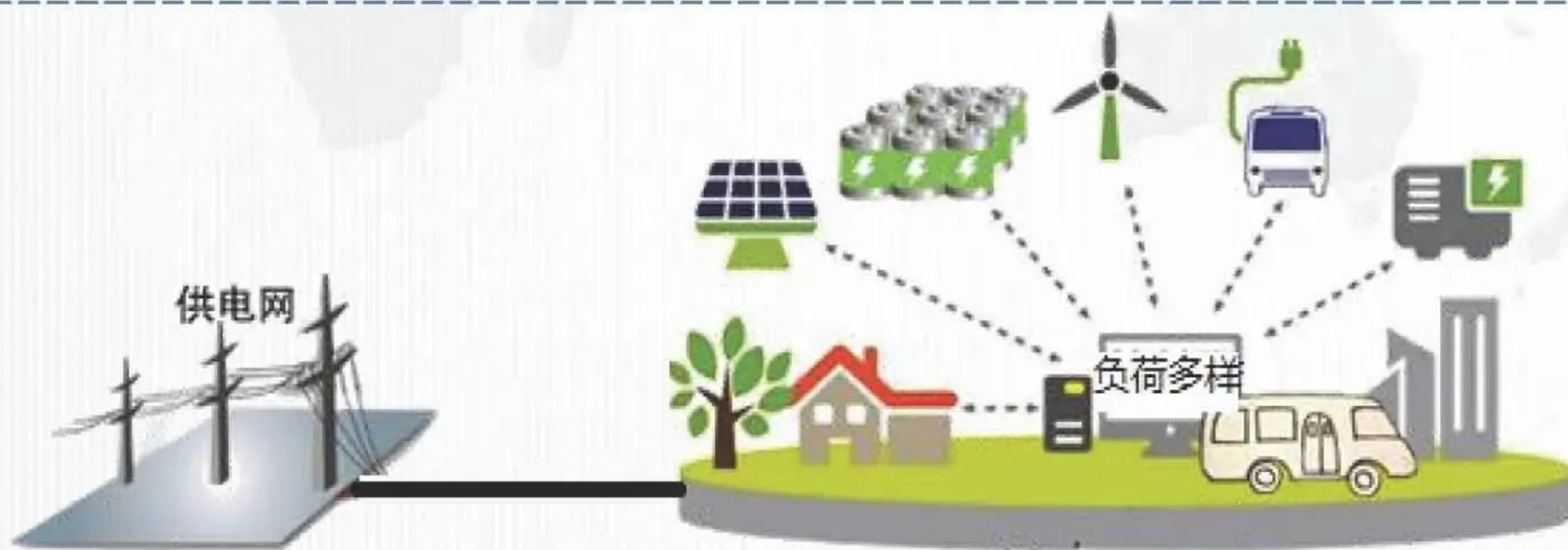
03

□ 在**孤岛**运行时，被无死区地可靠**切除**

## 配电网形态特征发展趋势及保护自愈要求 (3/3)

### 未来双向互动的用电形态下，大量分布式资源可为配电网提供保安生命线

- 总体看，随着新型电力系统的推进，用电形态将向双向互动转变。随着分布式电源、储能、电动汽车、智能家居、微电网等新型多元用电设备广泛接入，用户从“无源”变为“有源”，用电形态从单向辐射的、可预测的单一用电，逐步演进为双向互动的、难预测的多元用电。
- 大量分布式资源可为配电网提供保安生命线。多元分布式资源具备柔性调节、生产与消费兼具的特性，并具备与电网互动的灵活性，进入大规模接入阶段后，不仅可为配电网提供可观的负荷平抑与时空互济能力，更可为应对系统扰动与故障后的供电恢复过程提供主动支撑，提升新型电力系统韧性。



# 目录

TABLE OF CONTENTS

01 背景

02 问题的提出

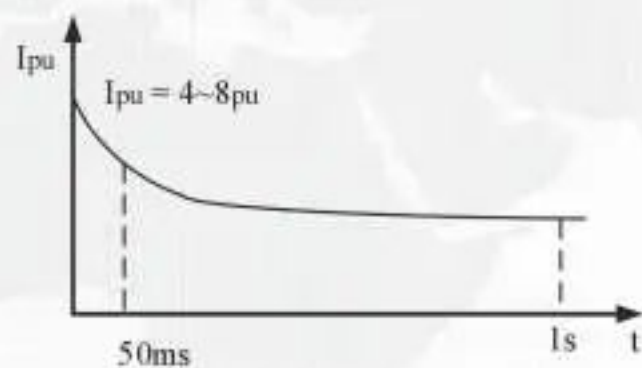
03 阶段性研究进展

04 小结

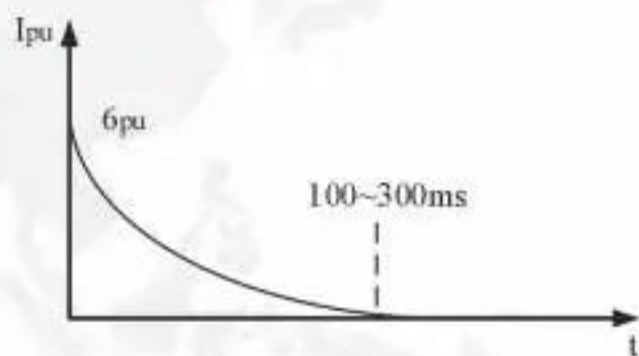


# 问题1 对线路侧保护的影响

分布式电源接入后，对于配网保护影响的实质，是其出口短路电流对不同测点的**助增或助减**作用，按照分布式电源提供的短路电流和系统提供短路电流的占比，其影响显著不同。



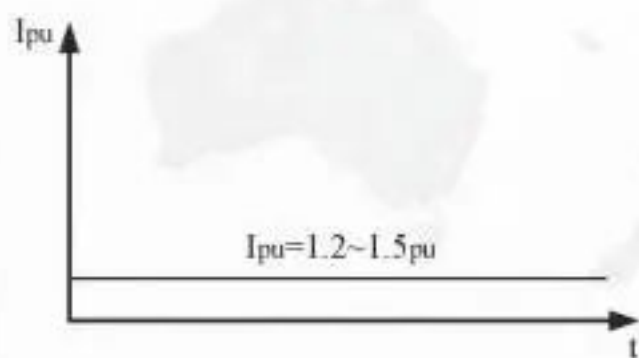
同步发电机



异步发电机

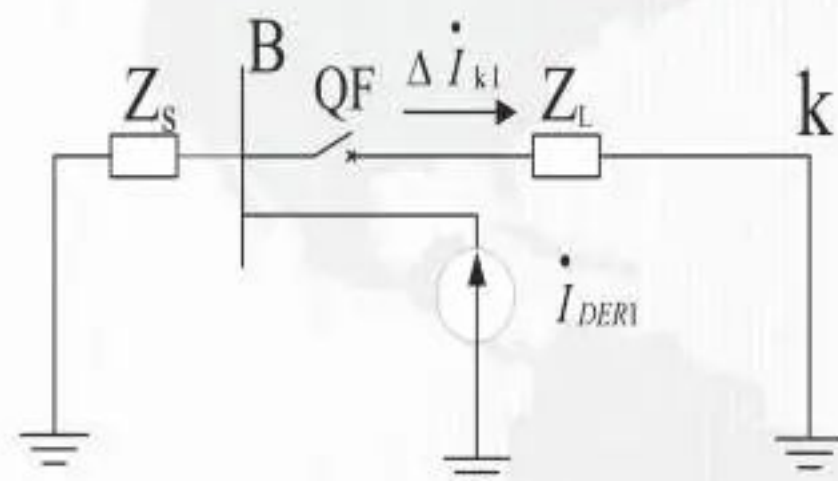


双馈发电机

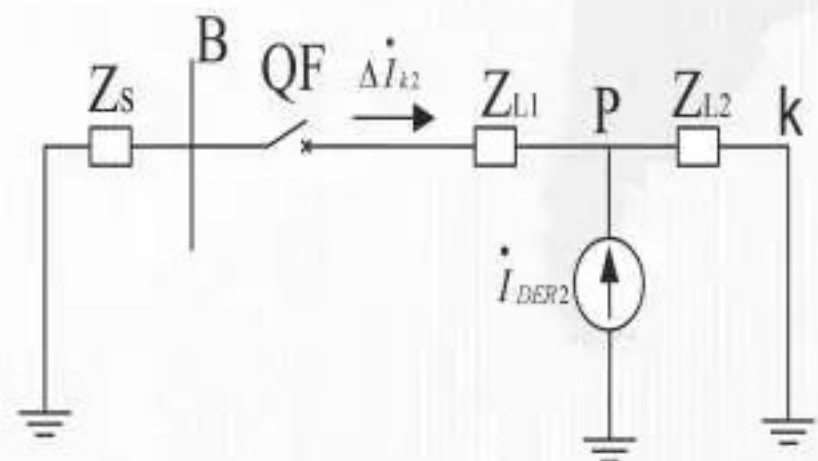


逆变器

不同类型分布式电源出口短路电流



助增作用

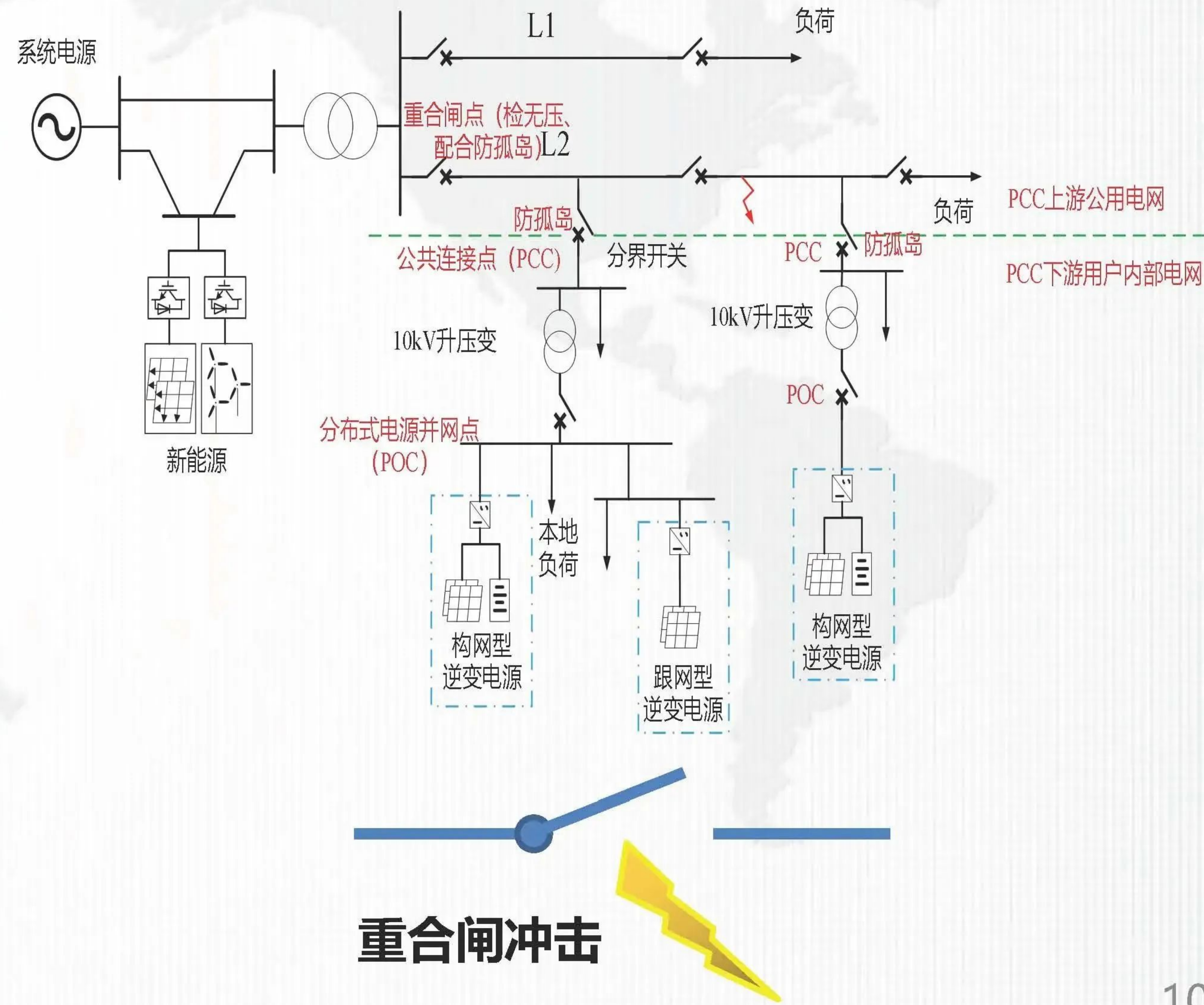


助减作用

# 问题2 对重合闸与馈线自动化的影响

## 对重合闸的影响

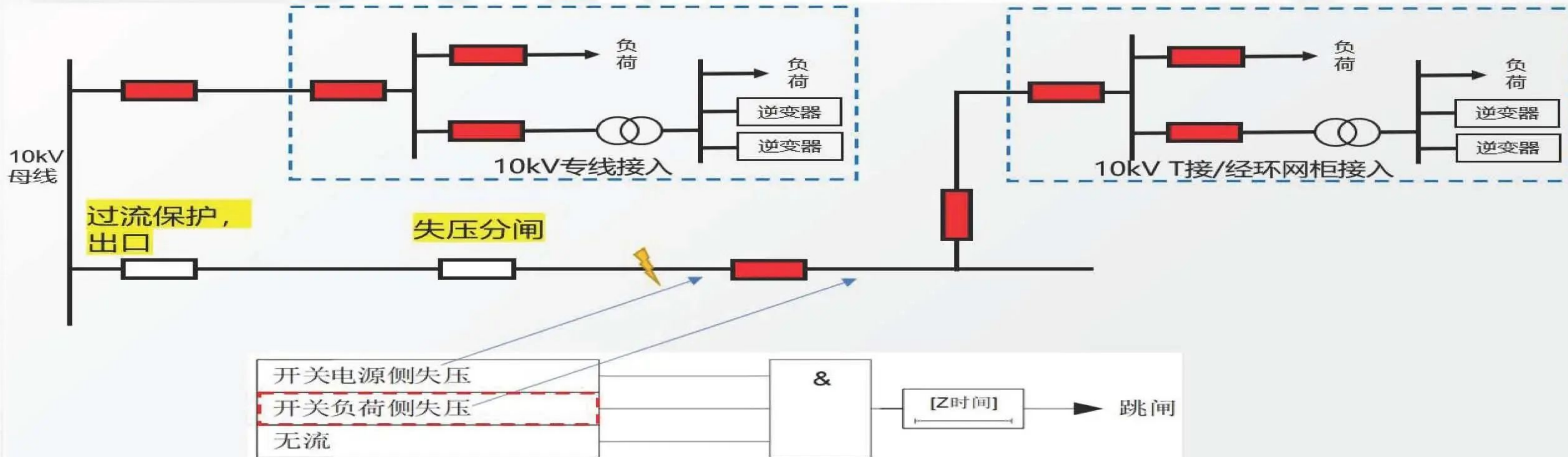
- 在**传统配电网**中，如果故障是瞬时性，当变电站的断路器动作跳闸后，没有电源继续对故障点供电，在等待一段时间后，故障电弧熄灭，断路器重合闸恢复对线路的供电。
- 而在**有源配电网**中，断路器跳闸后，分布式电源可能**继续给故障点供电**，将影响故障电弧的熄灭，**降低重合闸的成功率**，如果合闸时，分布式电源仍然没有脱离，将可能因**不同期合闸**产生**冲击电流**，给其带来危害。



# 问题2 对重合闸与馈线自动化的影响

## 对就地型馈线自动化的影响

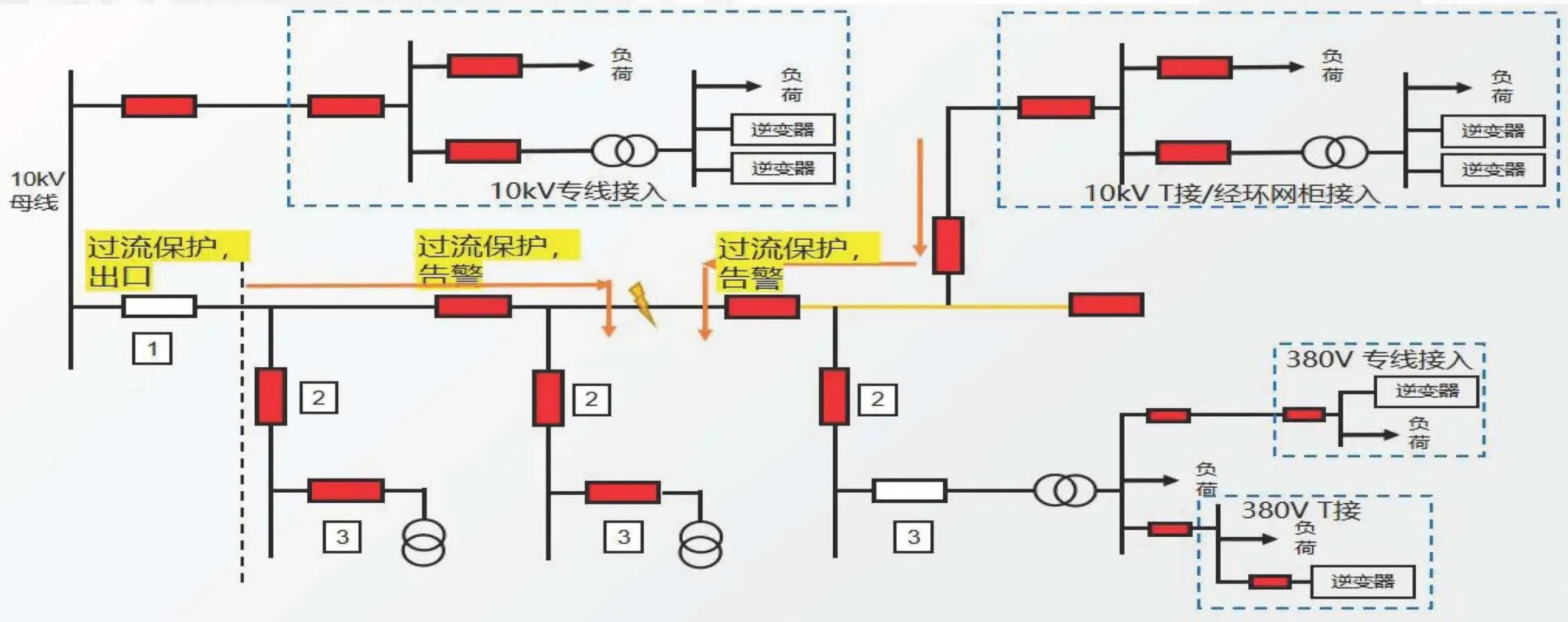
- 分闸逻辑:**需要同时满足开关电源侧和负荷侧失压以及无电流通过的条件，如果故障点下游有分布式电源未脱网，则会导致残压**影响失压分闸逻辑**，开关无法正常跳闸。
- 合闸逻辑:**需要满足一侧有压、另一侧无压以及无电流等条件，未脱网的分布式电源将导致开关**分位有流**，延时合闸逻辑无法满足。



# 问题2 对重合闸与馈线自动化的影响

## 对集中型馈线自动化的影响

当有源配电网发生故障时，分布式电源若未及时脱网，将向故障点注入短路电流，改变了传统配电网故障分布特征，引起主站对**故障范围误判**。

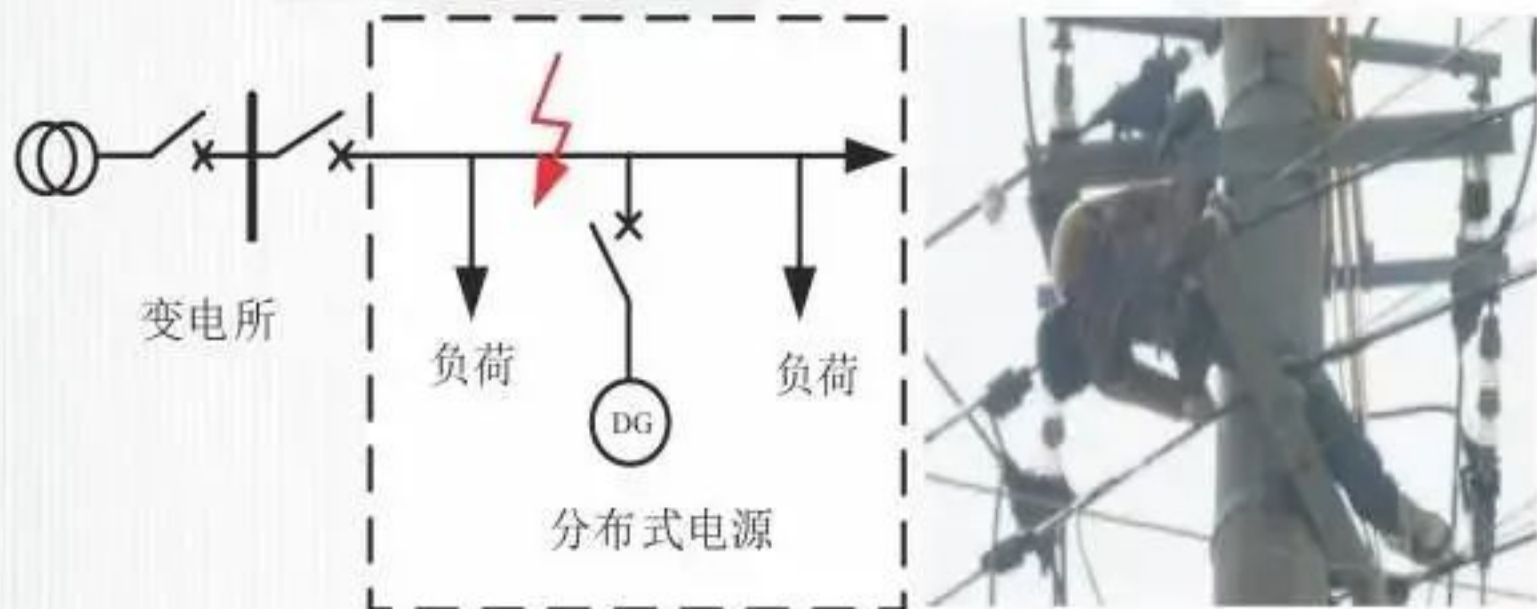




## 问题3 分布式电源侧保护问题

### 防孤岛保护问题概述

防孤岛保护的作用是在出现非计划孤岛运行状态时切除DER，以避免电压/频率损坏设备，并防止配电线路与设备继续带电，威胁运维人员安全。对于IIDER，目前还缺少外部故障时的保护手段，主要依靠防孤岛保护中的**电压与频率特征**动作于跳闸，因此防孤岛保护还起到DER外部故障保护的作用。



非计划孤岛

人身伤害

- 发电与用电功率不平衡时，电压与频率将发生变化，电能质量不合格，危害用电设备。
- DER倒送电危害检修人员安全。2022年4月9日，西藏墨脱线路抢修人员因用户侧DER倒送电触电死亡。
- 主网恢复送电时会出现非同同期重合闸



# 问题3 分布式电源侧保护问题

## 快速防孤岛保护与故障穿越的矛盾问题

- 中国防孤岛保护主要采用电压/频率保护。参照《GB/ T 33593-2017分布式电源并网技术标准》。
- 国际上最新版IEEE 1547要求DER应在电压/频率异常时具有穿越能力，电压保护动作时限最长达到了20s以上，导致故障后重合闸的等待时间延长。
- 事实上防孤岛保护的定值设置的过于灵敏虽然能**快速切除**DER，但将导致DER不具备穿越能力，在大电网故障与**系统扰动**时可能**造成DER大量脱网**，影响系统安全稳定运行，因此**快速防孤岛保护与故障穿越是个矛盾问题**。

### 中国防孤岛保护标准

- **GB/T 33593-2017**
  - 电压保护
    - 动作时间小于2 s.
  - 频率保护
    - 通过380 V 电压等级并网或10 (6) kV 电压等级接入用户侧的DER，当频率超出49.5 Hz-50.2 Hz范围时，应在0.2s内脱网。

### 国际防孤岛保护标准

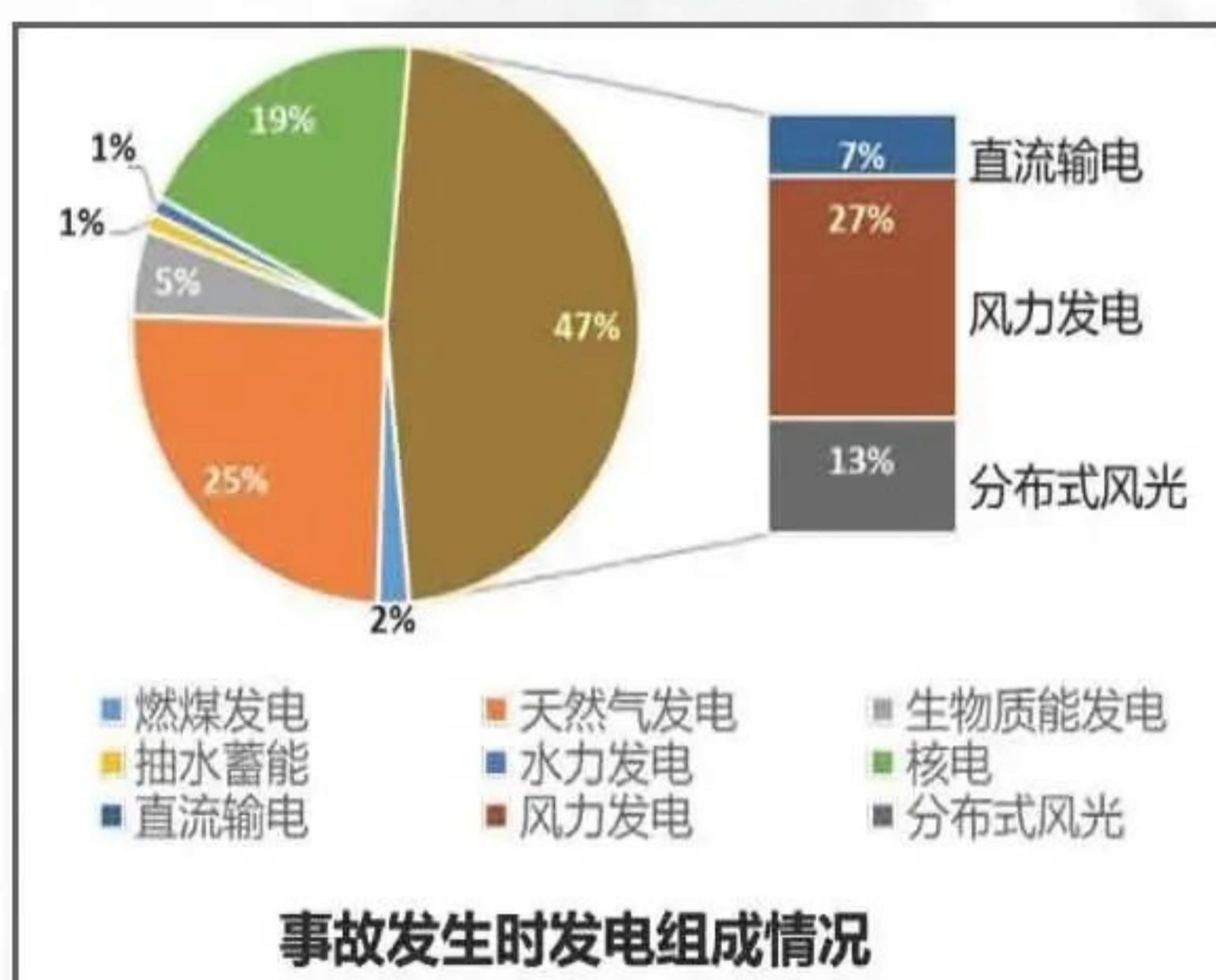
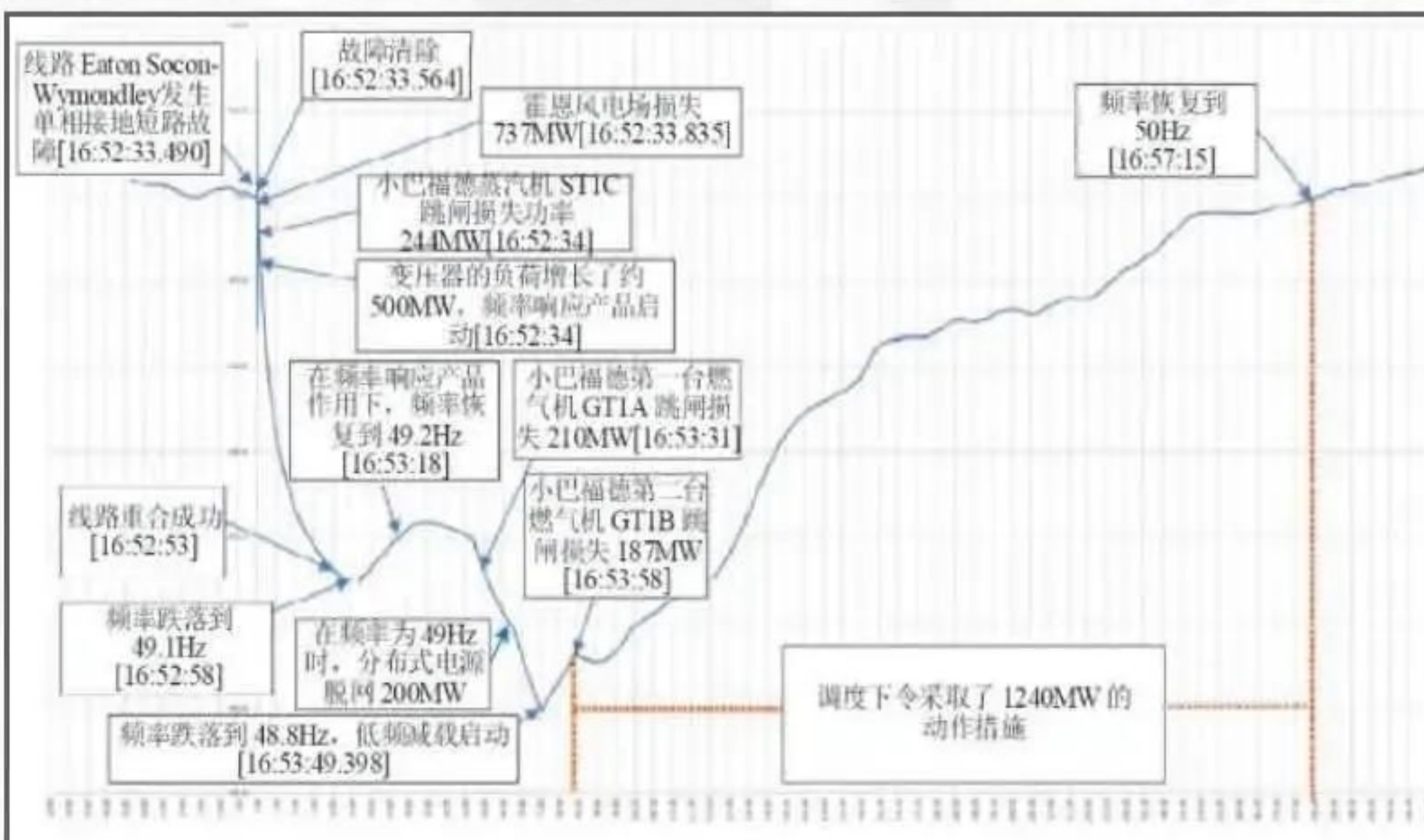
- **IEEE 1547.2003 (早期标准)**
  - 电压保护
    - 动作时间小于2 s
  - 频率保护
    - 频率范围 57-59.8 Hz之间动作时间可达300s

- **IEEE 1547. 2018 (最新)**
  - 电压保护
    - 动作时限与与电压穿越特性配合，最长超过20s。
    - 根据系统稳定运行的要求，将动作特性分为三类。
  - 频率保护
    - 与频率穿越特性配合

# 问题3 分布式电源侧保护问题

## 防孤岛保护的影响

早期的电压/频率防孤岛保护整定的比较灵敏，动作时限小于2s，在线路故障时能够快速切除DER，但在**大电网故障与系统扰动**时可能造成**DER大量脱网**。



## 英国8.9大停电事故：

如2019年8月9日的英国伦敦停电事故，就是因为输电线路故障期间电压相位突变防孤岛保护动作切除了150MW的DER，故障切除后随着频率的大幅下降又切除了大量的DER进而加剧了频率下降，触发了低频减负荷保护，自动切除了5%的负荷。英国伦敦北部输电线路遭遇雷击，后续接连发生电源出力损失共约190万千瓦，其中霍恩风电场因抗扰能力不足而脱网，导致出力损失约74万千瓦，故障冲击超出系统调节能力，引起频率持续跌落，触发低周减载动作，造成包括伦敦在内的大规模停电事故。事故发生时，风电出力占比超过30%。

# 目录

TABLE OF CONTENTS

01 背景

02 问题的提出

**03 阶段性研究进展**

04 小结

# 整体解决思路

## 有源配电网保护

### 解决现阶段工程实际问题

- 实现故障时分布式电源可靠脱网
- 线路侧保护可靠动作

### 1 第一阶段问题解决思路

分布式电源接入对线路侧保护的影响评估分析及对策

对重合闸影响分析及对策

对防孤岛保护影响分析及对策

对传统继电保护整定的影响评估

对就地型馈线自动化的影响评估

对集中型馈线自动化的影响评估

### 2 第二阶段问题解决思路

### 解决未来高比例分布式电源接入后面临的问题

- 实现分布式电源兼具扰动穿越与故障时快速脱网能力
- 故障精准定位隔离
- 区段外可支撑型分布式电源主动参与供电恢复

防孤岛保护与扰动穿越的平衡

配网侧与涉网侧保护的协同匹配

故障精准隔离与供电恢复技术

故障精准隔离技术

故障区段内分布式电源精准脱网

供电恢复技术

上述问题整体分为两个阶段解决





# 1 线路侧保护问题的阶段性研究进展（第一阶段）

## 关键技术1：适用于多类型DG多点并网的配电网多级方向电流保护方法

### 考虑DG接入影响的继电保护具体配置与整定原则

#### □ 出口保护

- **配置二次重合闸**。第一次重合闸确保瞬时性故障快速切除后尽快恢复供电；第二次重合闸纠正I段保护区内分支线路永久性故障时出口开关越级跳闸。重合闸时间需躲过断路器跳闸后其下游DG孤岛保护动作时间。
- **II段**：按躲过线路**5倍**的最大负荷电流和下级配电变压器二次侧短路最大短路电流整定，适当降低整定值，**避免受DG影响拒动，延长保护范围**。
- **针对出口保护III段可能拒动的问题**，一是按躲过2.5倍最大负荷电流整定；二是增加过负荷保护，整定值大于1.2倍的最大负荷电流，统一选为**600A**，动作时限整定为**15~20s**，确保故障不会长期存在。

#### □ 分段保护

- 分段保护**电流II段**根据出口保护电流II段按**40%**的比例调整，**电流保护III段**无需调整。
- **II段**按躲过线路**5倍**的最大负荷电流和下级配电变压器二次侧短路最大短路电流整定，适当降低整定值，**延长保护范围**。

#### □ 分支和分界保护

- 分支和分界保护的电流保护**II段**整定值只需根据上级保护按**90%**和**80%**的比例调整，**电流保护III段**无需调整。



# 1 线路侧保护问题的阶段性研究进展 (第一阶段)

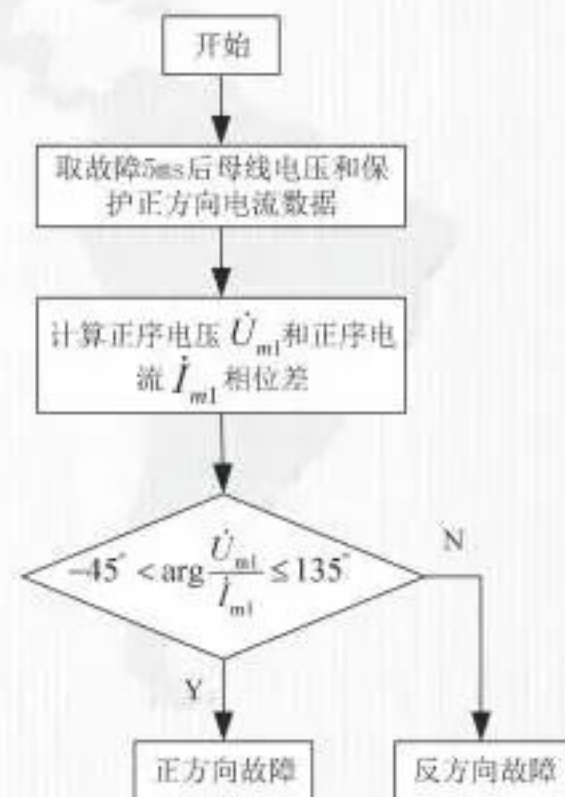
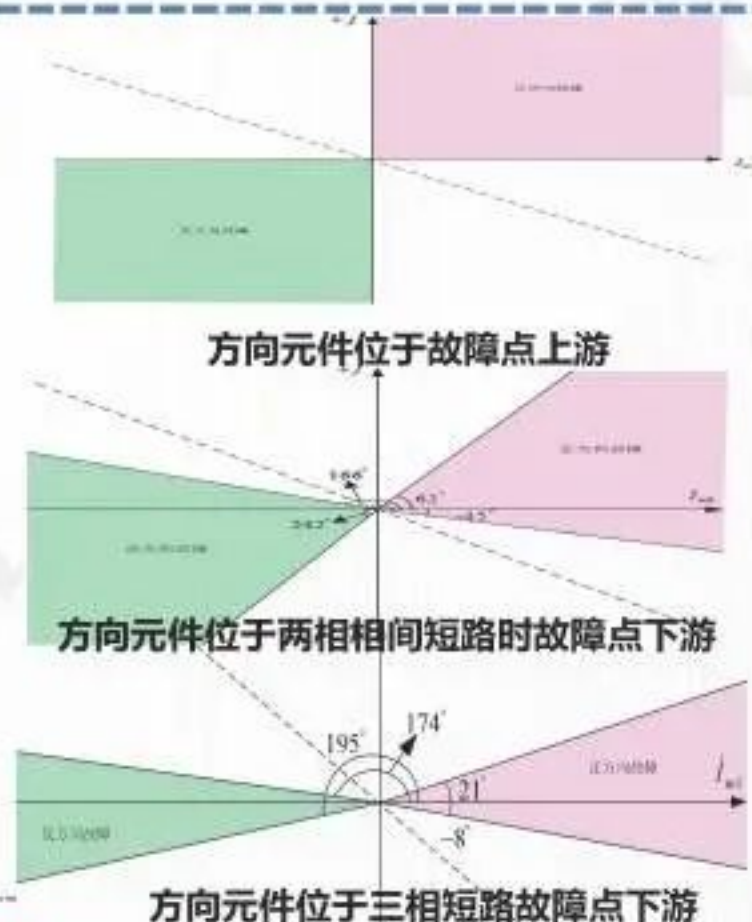
## 关键技术1: 适用于多类型DG多点并网的配电网多级方向电流保护方法

### 各级保护处配置基于正序阻抗角差异的方向闭锁元件

□ **方向电流保护**: 在电流保护的基础上增加方向元件构成方向电流保护。满足电流保护动作条件同时判别为正方向故障时, 保护可靠动作; 当检测到反方向故障或短路电流小于整定值时保护不动作。

### □ 方法优势:

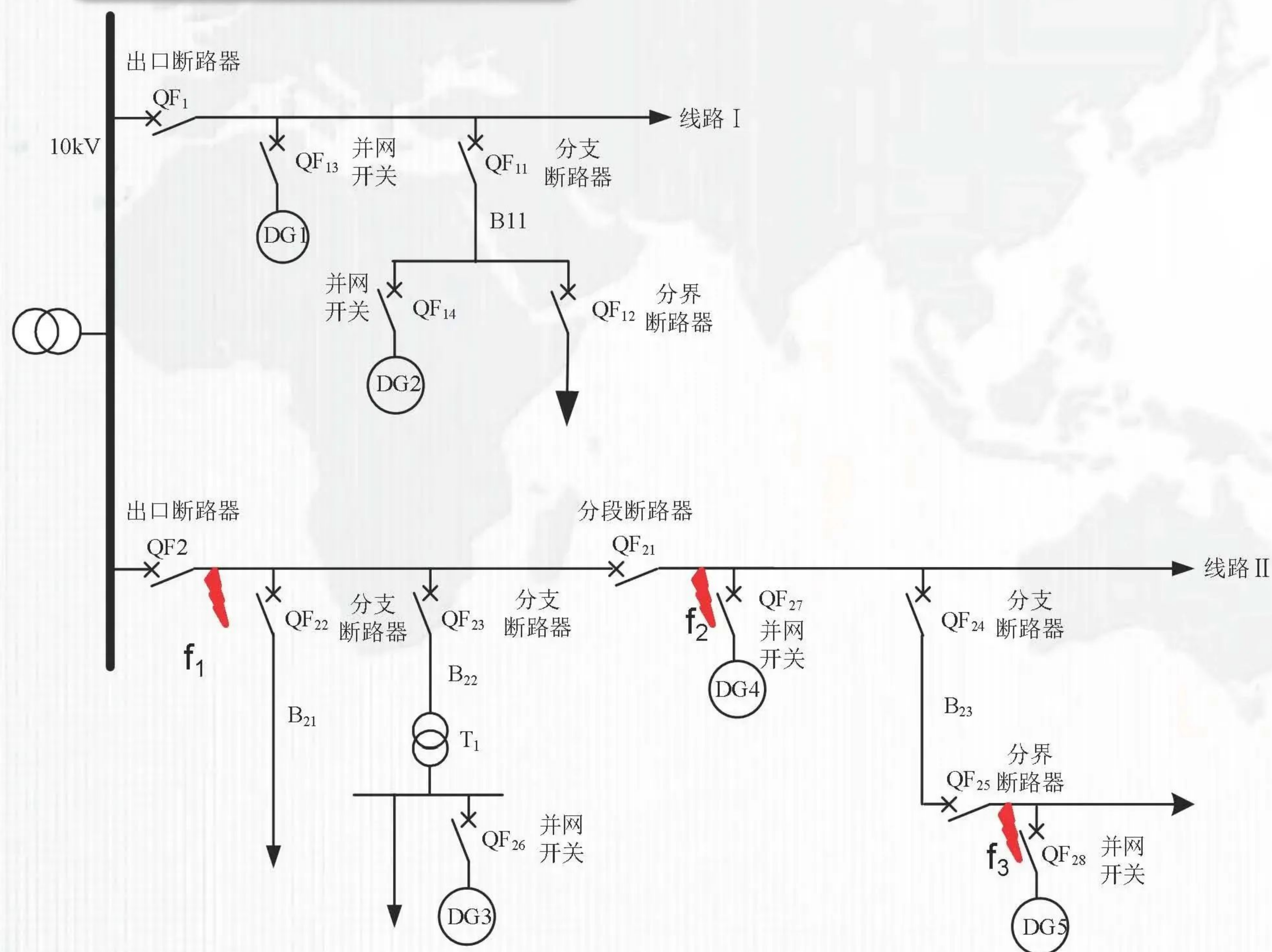
- 动作区域对称, 整定简单, **无需**根据配电网运行方式的变化**进行判据调整**, 现场应用简单方便;
- 适用于不同类型DG多点并网, 计及IIDG低电压穿越要求, 保护可在允许时限内就近切除故障, 不受DG出力随机性和复杂性的影响, **100%渗透率下均能快速可靠动作**。



# 1 线路侧保护问题的阶段性研究进展 (第一阶段)

## 关键技术1: 适用于多类型DG多点并网的配电网多级方向电流保护方法

### 案例仿真分析



10kV配电网典型结构

□ 选取10kV典型配电网搭建仿真模型，对配电网原保护方案进行适当改进，各处增加基于正序阻抗角的方向元件，部分整定值进行调整。

开关	电流I段	电流II段	电流III段	过负荷保护	
出线	QF <sub>1</sub>	8kA, 0.15s	2.5kA, 0.55s	1.2kA, 1.7s	0.6kA, 15~20s
	QF <sub>2</sub>	8kA, 0.15s	2.4kA, 0.55s	0.9kA, 1.7s	0.6kA, 15~20s
分段	QF <sub>21</sub>	无	0.96kA, 0.55s	0.48kA, 1.4s	无
分支 (分段上游)	QF <sub>11</sub>	无	2.3kA, 0.3s	0.4kA, 1.4s	无
	QF <sub>22</sub>	无	2.2kA, 0.3s	0.4kA, 1.4s	无
分支 (分段下游)	QF <sub>23</sub> QF <sub>24</sub>	无	0.87kA, 0.3s	0.4kA, 1.1s	无
分界 (分段上游分支的下游)	QF <sub>12</sub>	无	2.0kA, 0.1s	0.3kA, 1.1s	无
分界 (分段下游分支的下游)	QF <sub>25</sub>	无	0.77kA, 0.1s	0.3kA, 0.8s	无

调整后的保护配置和整定方案



# 1 线路侧保护问题的阶段性研究进展 (第一阶段)

## 关键技术1: 适用于多类型DG多点并网的配电网多级方向电流保护方法

### 并网DG均为IIDG

- 假设所有并网DG均为IIDG，仿真分析DG渗透率分别为30%、70%和100%，线路发生三相短路和两相相间短路时，各位置短路电流、正序电压电流相位差、方向判别结果和保护动作情况，验证所提方向判据和保护**均能保证保护正确动作**。

DG容量 (MVA)	故障位置	保护装置	测量电流值 (kA)	测量正序电压电流相位差 (°)	原保护动作情况	方向判别结果	改进后的保护动作情况
DG18.0; DG2: 0.66; DG3: 1.0; DG4: 4.0; DG5: 1.0	f1	保护2	12.66	63	I段动作	正	I段动作
		保护2	1.50	77	III段启动	正	III段启动
	f2	保护21	1.47	81	II段动作	正	II段动作
		保护2	1.94	73	III段启动	正	III段启动
		保护21	1.91	77	II段启动	正	II段启动
		保护24	2.21	68	II段启动	正	II段启动
		保护25	2.21	67	II段动作	正	II段动作

三相短路时电气测量值及保护动作情况

DG容量 (MVA)	故障位置	保护装置	测量电流值 (kA)	测量正序电压电流相位差 (°)	原保护动作情况	方向判别结果	改进后的保护动作情况
DG1: 8.0; DG2: 0.66; DG3: 1.0; DG4: 4.0; DG5: 1.0	f1	保护2	10.55	82	I段动作	正	I段动作
		保护2	1.20	90	III段启动	正	III段启动
	f2	保护21	1.15	97	II段拒动	正	II段动作
		保护2	1.57	84	III段启动	正	III段启动
		保护21	1.53	90	II段启动	正	II段启动
		保护24	1.86	69	II段启动	正	II段启动
		保护25	1.86	69	II段动作	正	II段动作

两相相间短路时电气测量值及保护动作情况  
原保护拒动，改进后的保护正常动作



# 1 线路侧保护问题的阶段性研究进展 (第一阶段)

## 关键技术1: 适用于多类型DG多点并网的配电网多级方向电流保护方法

### 多类型DG并网

□ 假设DG1、DG3和DG5为同步发电机，DG2和DG4为IIDG，仿真分析DG总渗透率分别为30%、70%和100%，线路发生两相相间短路和三相短路时，各位置短路电流、正序电压电流相位差、方向判别结果和保护动作情况，验证所提方向判据和保护**均能保证保护正确动作**。

DG容量 (MVA)	故障位置	保护装置	测量电流值 (kA)	测量正序电压电流相位差 (°)	原保护动作情况	方向判别结果	改进后的保护动作情况
DG1: 8.0 DG2: 0.66 DG3: 1.0 DG4: 4.0 DG5: 1.0	f1	保护1	3.22	-118	II段启动	未启动	不动作
		保护2	14.88	62	I段动作	正	I段动作
		保护21	1.87	-115	II段启动	反	不动作
	f2	保护2	1.16	63	不动作	正	III段启动
		保护21	1.11	62	不动作	正	II段动作
	f3	保护2	1.60	64	III段启动	正	III段启动
		保护21	1.57	63	II段启动	正	II段启动
		保护24	2.83	67	II段启动	正	II段启动
		保护25	2.83	66	II段动作	正	II段动作

原保护误动或拒动，改进后的保护正常动作

三相短路时电气测量值及保护动作情况

DG容量 (MVA)	故障位置	保护装置	测量电流值 (kA)	测量正序电压电流相位差 (°)	原保护动作情况	方向判别结果	改进后的保护动作情况
DG1: 8.0 DG2: 0.66 DG3: 1.0 DG4: 4.0 DG5: 1.0	f1	保护2	12.91	78	I段动作	正	I段动作
		保护21	1.61	-103	II段启动	反	不动作
	f2	保护2	1.03	61	不动作	正	III段启动
		保护21	0.98	62	不动作	正	II段动作
	f3	保护2	1.42	64	III段启动	正	III段启动
		保护21	1.37	64	II段启动	正	II段启动
		保护24	2.48	70	II段启动	正	II段启动
		保护25	2.48	70	II段动作	正	II段动作

原保护误动或拒动，改进后的保护正常动作

两相相间短路时电气测量值及保护动作情况

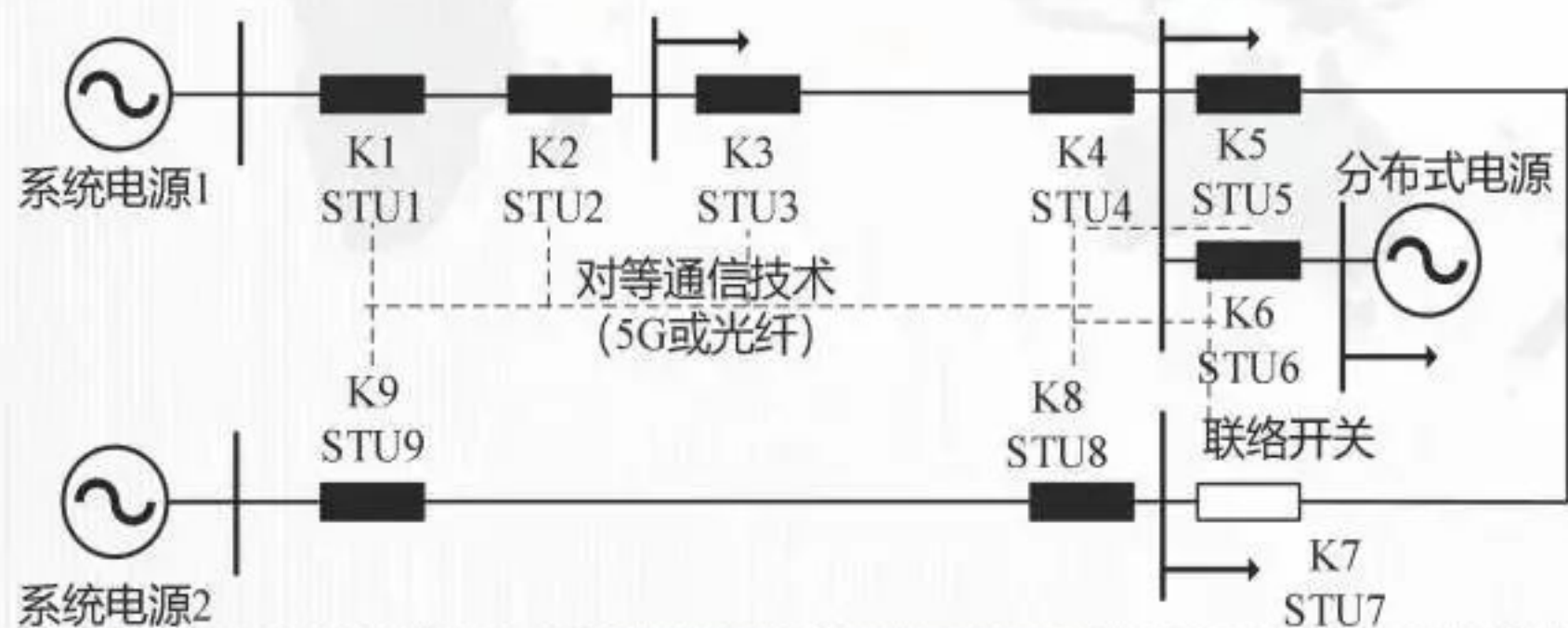


# 1 线路侧保护问题的阶段性研究进展（第二阶段）

**线路侧保护第二阶段目标：故障精准定位隔离，仅故障区段分布式电源脱网**

**关键技术2：基于对等通信手段的故障精准定位隔离技术**

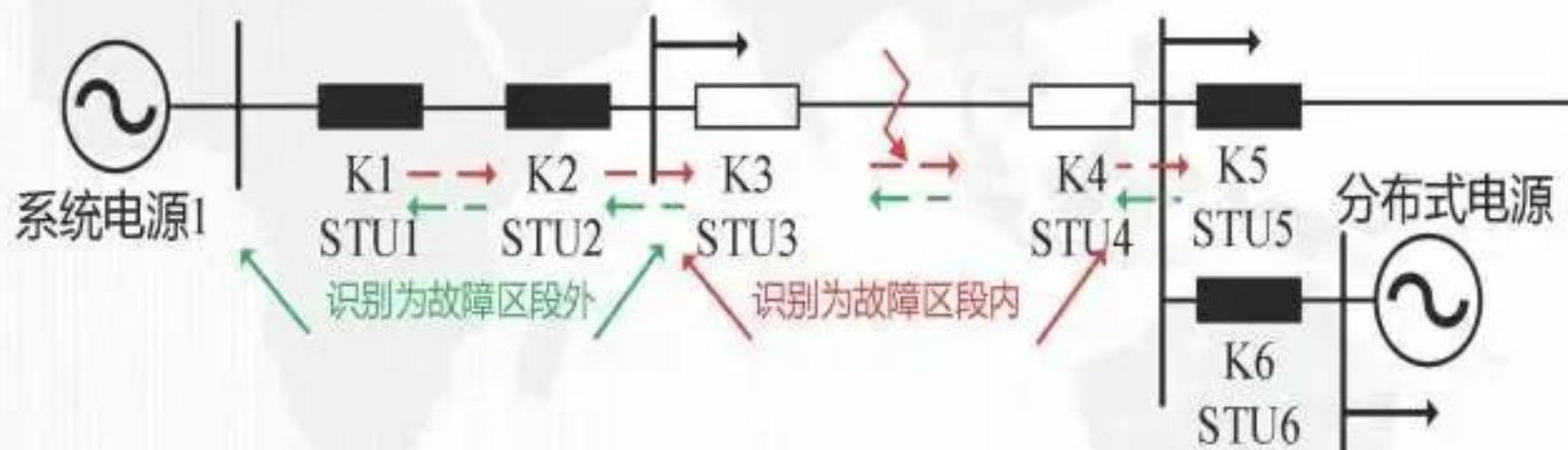
- **当前技术难点：**当前保护方法难以最小化定位故障区段，易造成非故障区段的分布式电源大面积脱网。
- **技术优势：**基于对等通信技术手段（例如5G、光纤差动），能**准确识别出故障区段**，实现**故障快速精准的定位与隔离**。**故障区段内**的分布式电源快速启动防孤岛保护**脱网**，**区段外**的具备主动支撑能力的分布式电源**不脱网**，并在供电恢复过程中充分发挥分布式电源的**主动支撑**作用。



# 1 线路侧保护问题的阶段性研究进展 (第二阶段)

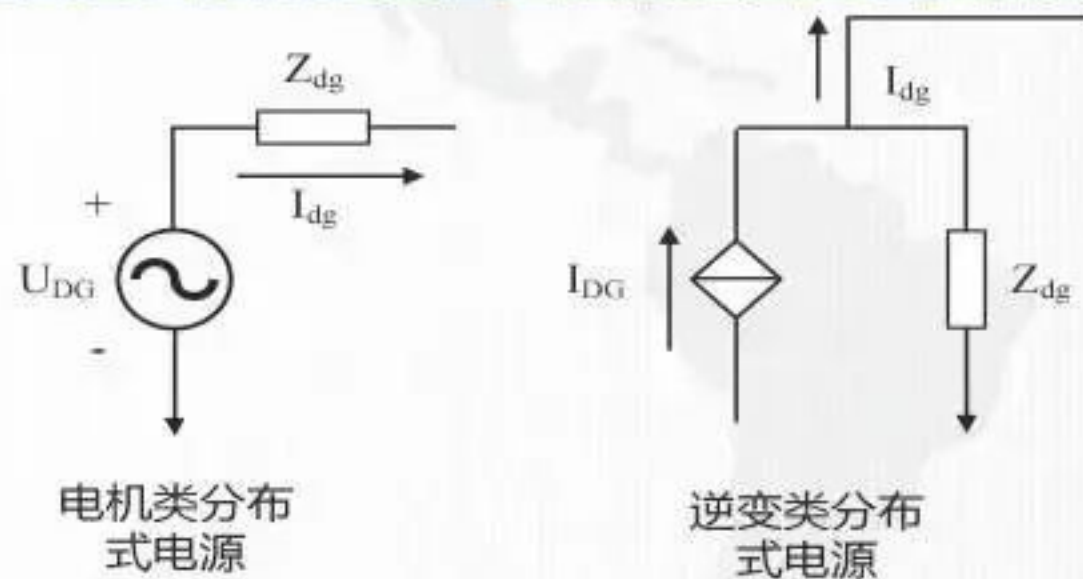
## 分布式故障定位与隔离

- 线路出现故障时，各STU通过对等通信，互相查询相邻STU的电流信息，利用电流差动保护原理判定故障区段。识别为故障区段内时，STU控制对应断路器断开，隔离故障。同时，联跳分布式电源PCC开关，实现分布式电源可靠脱网。



### 区段内部故障特点:

- 系统侧电源与分布式电源同时向故障点馈入短路电流
- 电机类分布式电源馈入的短路电流与传统同步机电源性质相似
- 逆变类分布式电源馈入的短路电流性质取决于逆变器控制策略，会产生较大的相位突变，两侧电流相角差范围为 $0^\circ \sim 150^\circ$



### 区段外部故障特点:

- 区段外部为非故障区段，流经两侧的电流大小相等，方向相反。



## 2 重合闸与馈线自动化问题的阶段性研究进展

### 重合闸问题解决思路

### 当前技术存在的问题

#### □当前技术：

- 关于公共配电网故障重合闸与DER防孤岛保护的配合，第一阶段解决方案主要是**加大重合闸等待时间**或**通过通信网络加快DER脱网速度、检无压**、减少重合闸等待时间。

#### □存在的问题：

- 重合闸等待时间长（供电恢复慢）
- 依赖通信通道（需考虑经济性）
- 需要在线路侧安装电压互感器（需考虑经济性）



## 2 重合闸与馈线自动化问题的阶段性研究进展

### 重合闸问题解决思路

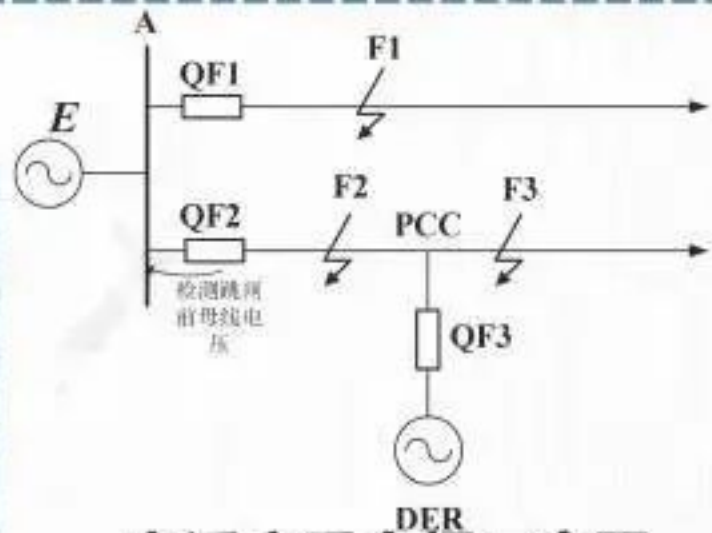
重合闸问题解决目标：自适应，兼顾供电可靠性与安全性

### 关键技术3：就地型自适应重合闸技术

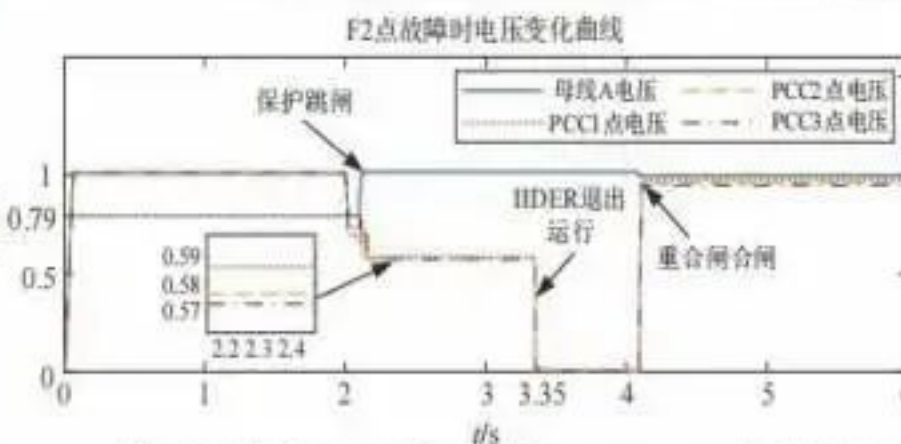
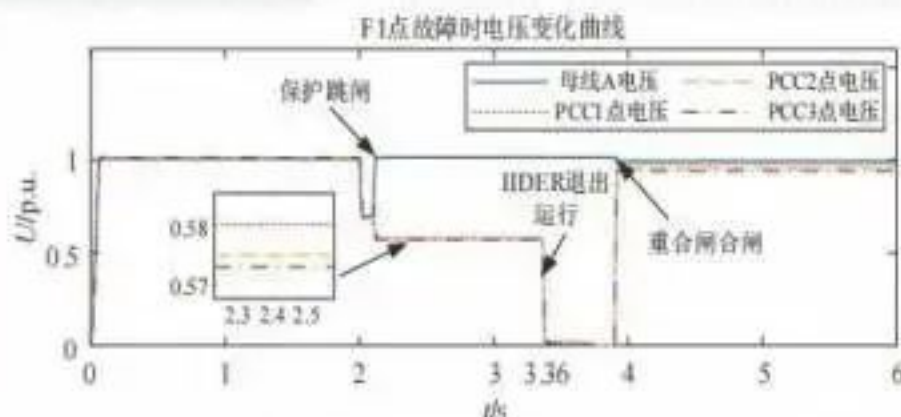
- 提出一种就地型自适应重合闸方法，该方法通过**检测跳闸之前的母线侧电压**，根据预先设定的考虑低电压穿越的防孤岛保护动作时间，调整重合闸动作时间，从而实现重合闸与防孤岛保护的配合，实现自适应重合闸。

#### 方法优势

- 该方法通过重合闸与分布式电源防孤岛保护的时间配合来实现自适应重合闸，**不需要增加线路侧电压互感器，不依赖于通信网络**，易于实现，经济性好，提升供电可靠性与安全性。



自适应重合闸示意图

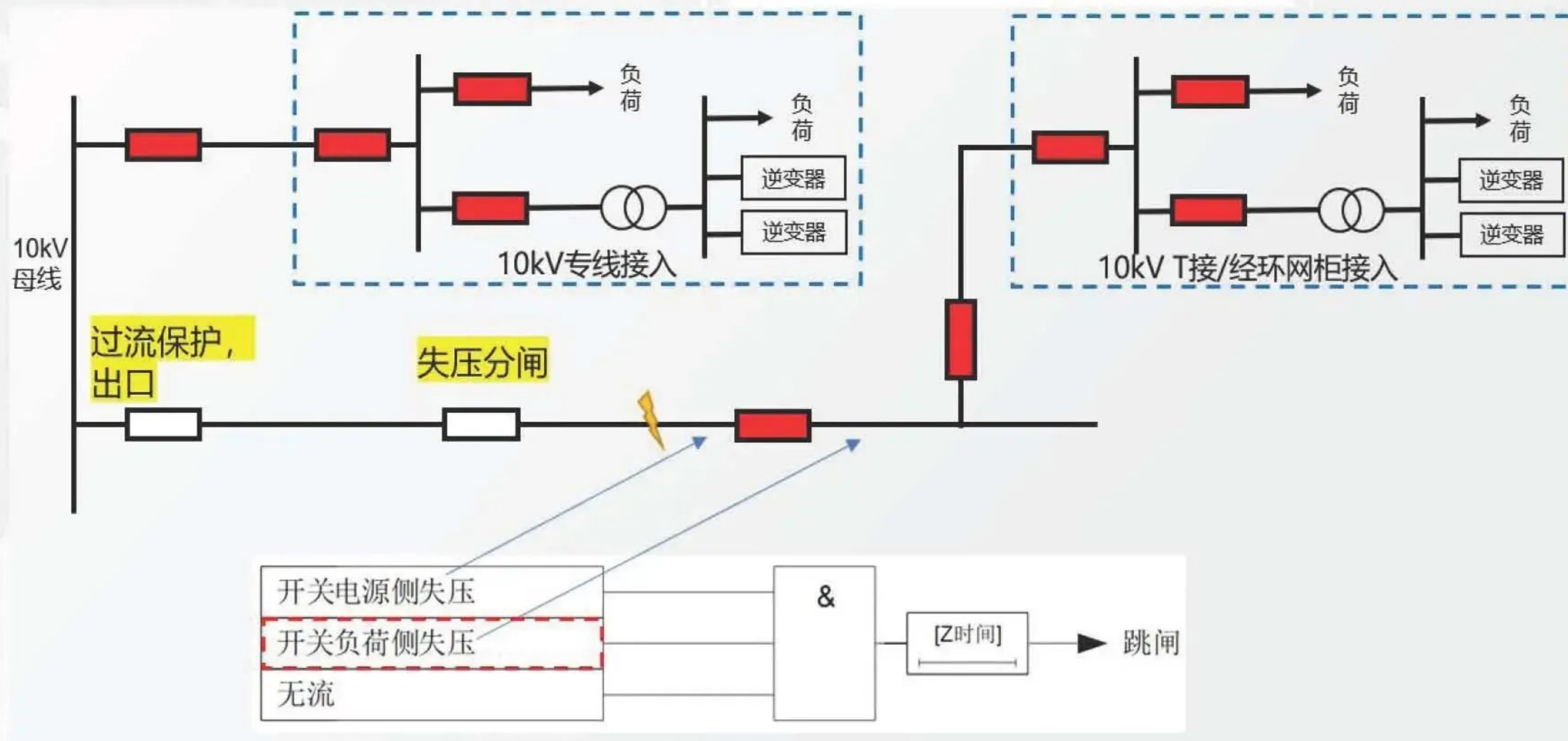


F1 F2短路故障时母线及PCC点的电压变化

## 2 重合闸与馈线自动化问题的阶段性研究进展

馈线自动化问题解决目标：馈线自动化可靠动作

对就地型馈线自动化的影响问题解决思路



- **对策：**针对就地型馈线自动化，必须确保防孤岛保护动作可靠性。

## 2 重合闸与馈线自动化问题的阶段性研究进展

### 对集中型馈线自动化的影响问题解决思路

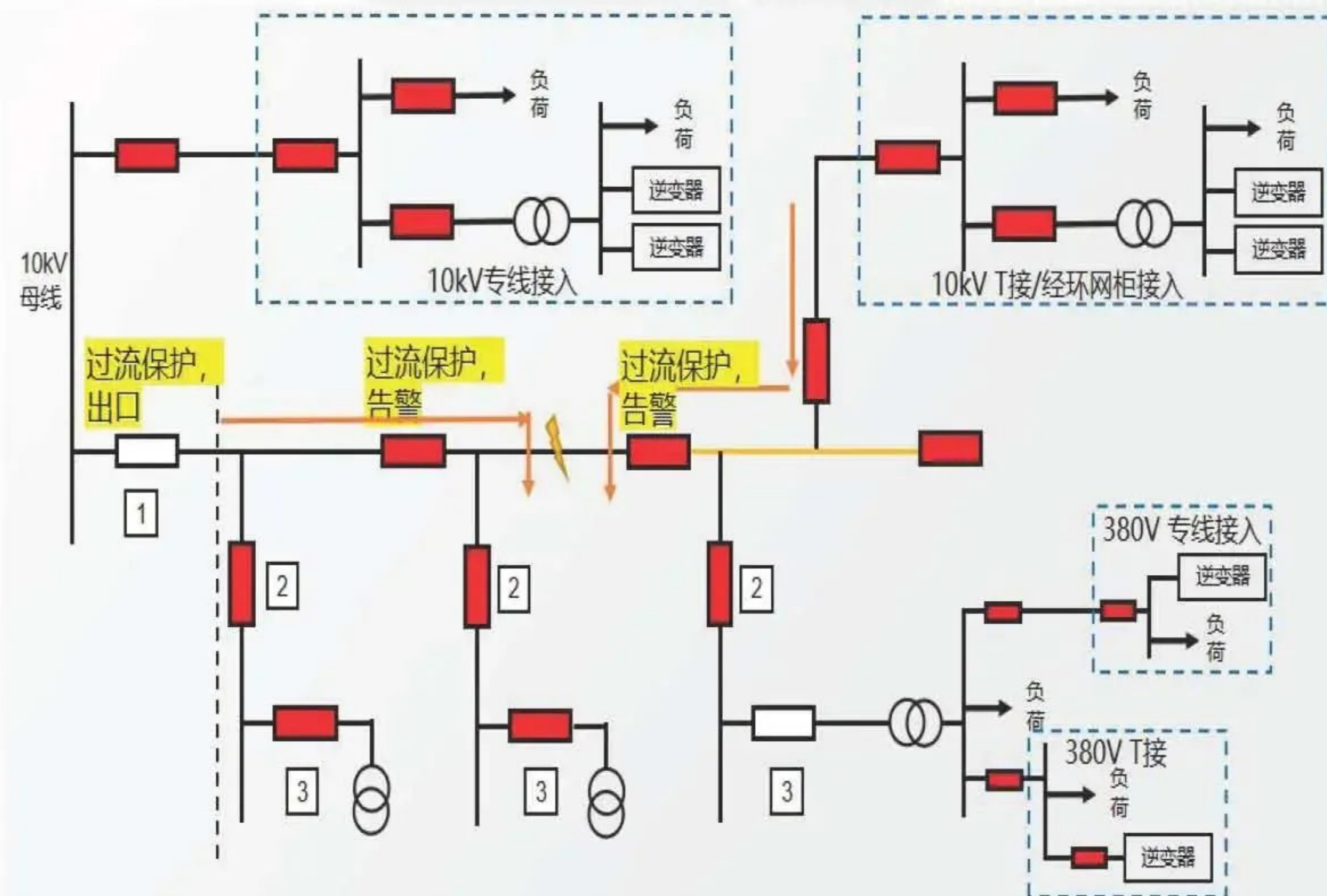
#### 对策：可靠防孤岛保护与方向保护相结合

##### ● 一是优化防孤岛保护性能

通过可靠防孤岛来避免分布式电源注入电流的影响。在主站定位故障区域前，首先确保所有分布式电源可靠脱网。

##### ● 二是加装方向保护元件

在有分布式电源接入的馈线加装检正序阻抗角方向闭锁保护元件，正确判别故障特征，避免分布式电源注入带来的误告警。

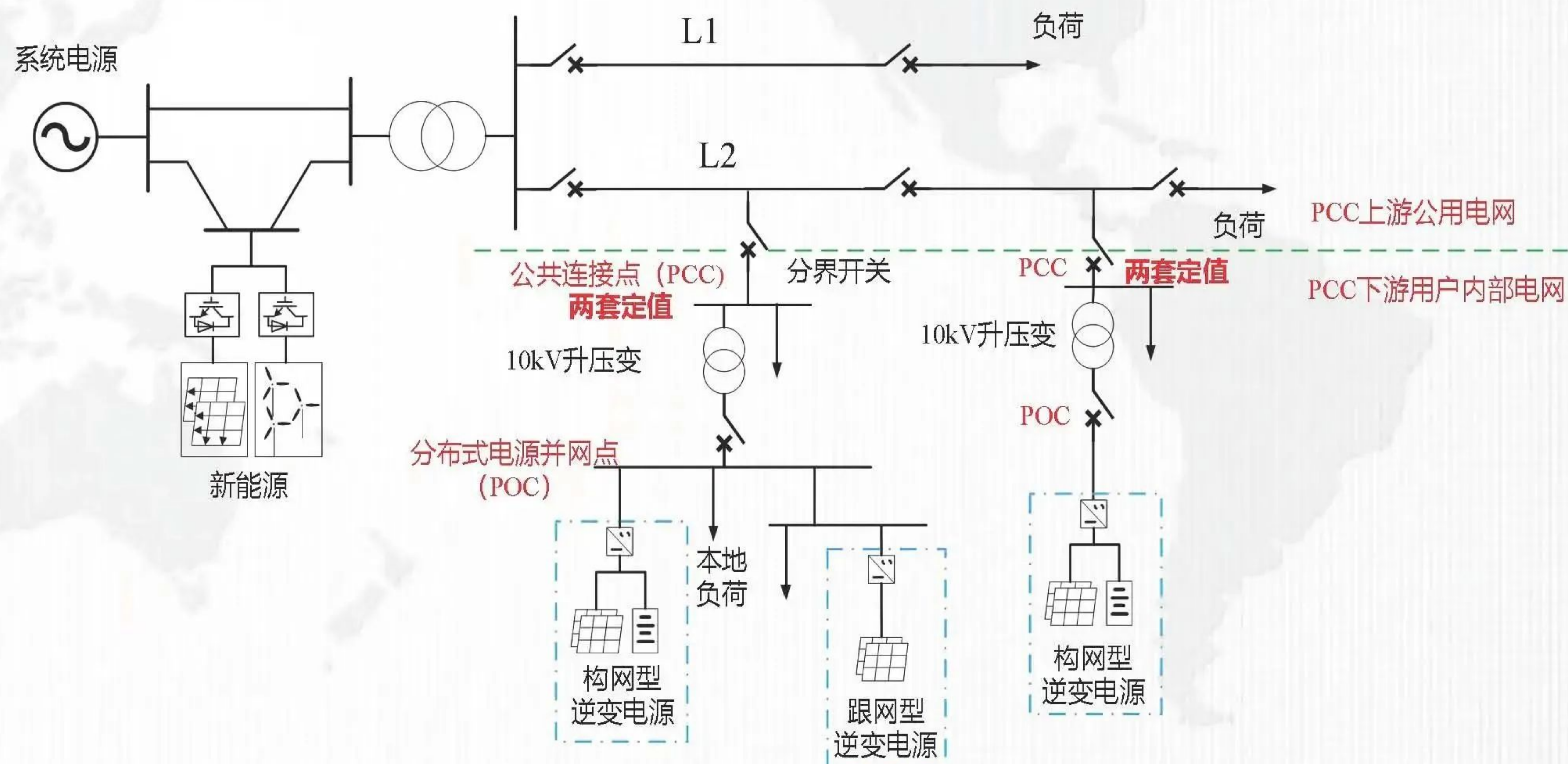


# 3 分布式电源侧保护问题的阶段性研究进展

## 第一阶段：防孤岛保护问题解决思路

防孤岛问题第一阶段解决目标：故障发生后快速可靠防孤岛动作

□ **POC点与PCC点均配置防孤岛保护开关**：包括DER就地的防孤岛保护以及PCC开关防孤岛保护，后者是前者的远后备保护。利用**电压/频率法**保证故障发生时分布式电源可靠脱网。参照国标GB/T 33593-2017执行。

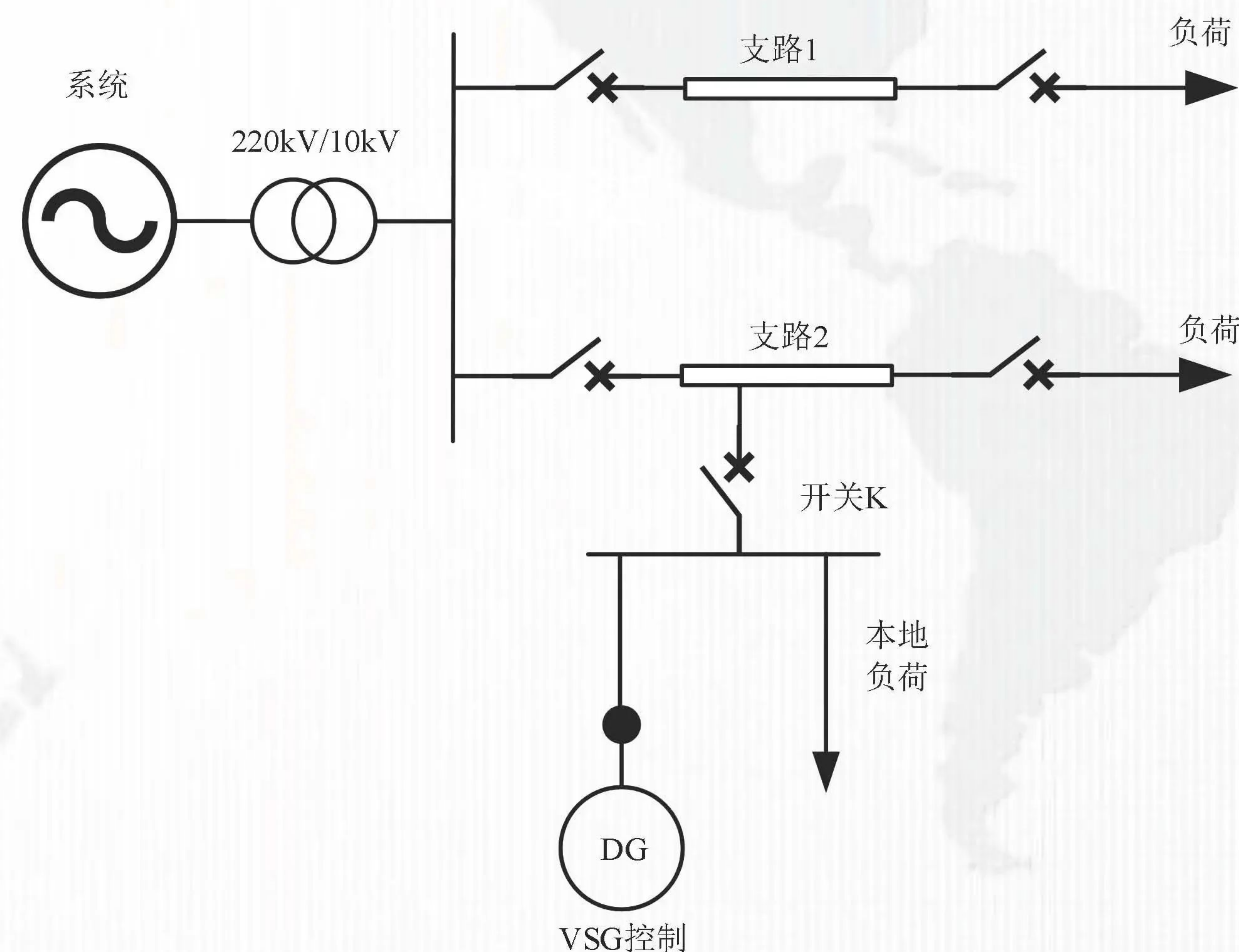


# 3 分布式电源侧保护问题的阶段性研究进展

## 第一阶段：防孤岛保护问题解决思路

### VSG型并网逆变器的孤岛检测面临的问题

- **虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generators, VSG)型分布式电源**：VSG控制可以让逆变器模拟同步发电机的输出特性，具有构网能力，在孤岛情况下不用切换控制策略。
- **VSG型分布式电源防孤岛检测问题**：传统基于过/欠频的被动式孤岛检测方法的检测盲区会随着VSG控制策略下垂系数的减小而增大，造成孤岛检测方法失效。





# 3 分布式电源侧保护问题的阶段性研究进展

## 第一阶段：防孤岛保护问题解决思路

### 关键技术4：一种适用于VSG并网逆变器的孤岛检测方法

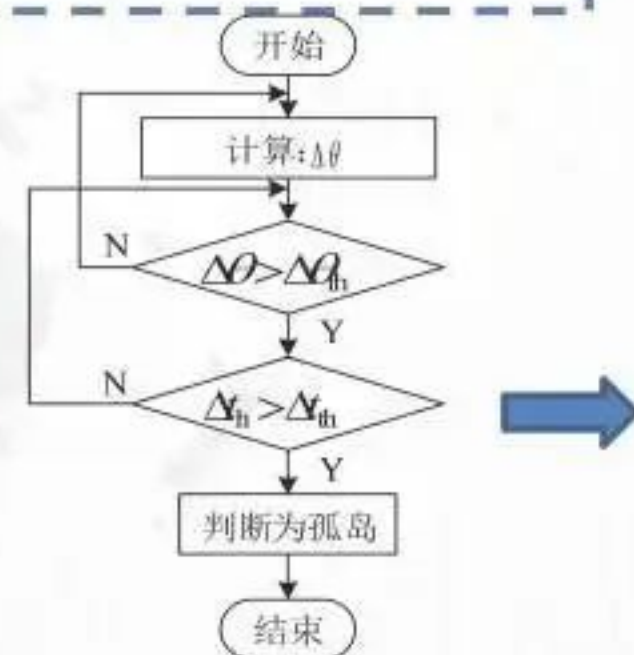
□ **原理：**采用dq坐标系下计算的电压相位变化率进行孤岛检测，并在VSG有功环中加入角速度误差负反馈，可将孤岛检测的频率死区从[49.5, 50.5]Hz降低为(49.9, 50.1)Hz。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega_n t) & \cos(\omega_n t - 120^\circ) & \cos(\omega_n t + 120^\circ) \\ \sin(\omega_n t) & \sin(\omega_n t - 120^\circ) & \sin(\omega_n t + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi) \\ \cos(\omega t + \varphi - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + \varphi + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

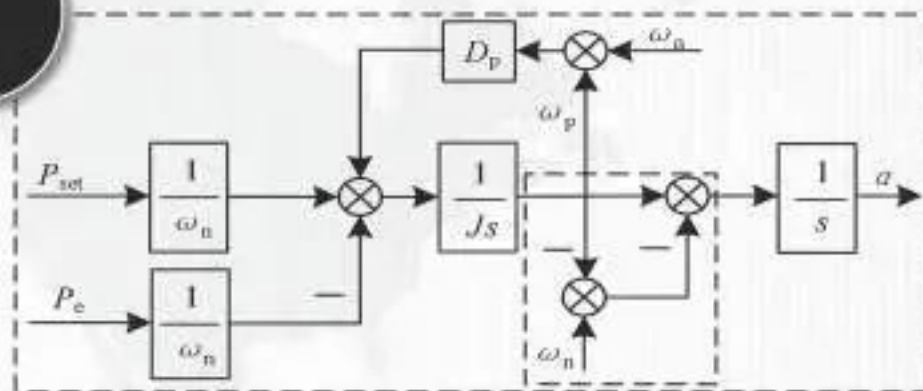
将电压相量U经Park变换到dq坐标系下

$$\theta = \arctan\left(-\frac{u_q}{u_d}\right) = \int \omega - \omega_n dt + \varphi \quad \Rightarrow \quad \Delta\theta = \frac{\theta_N - \theta_{(N-1)}}{\Delta t}$$

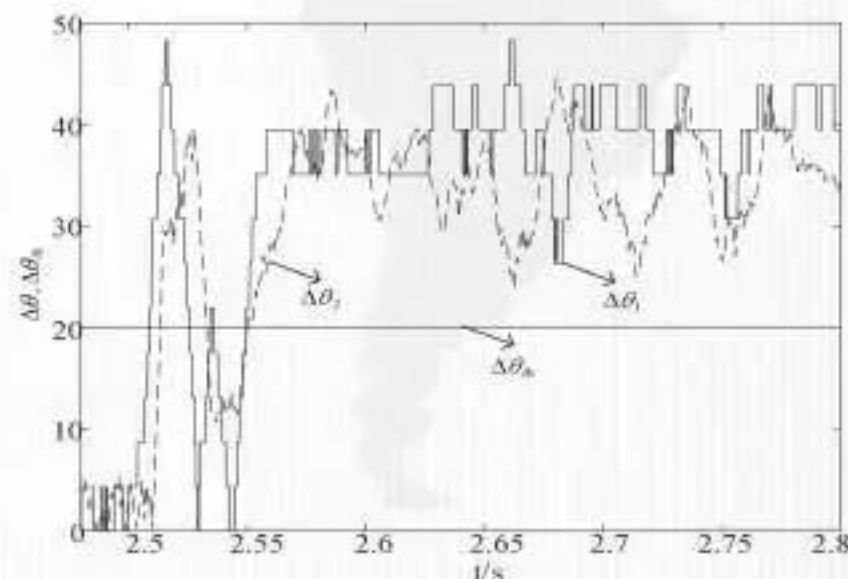
计算电压相量U的相位及相位变化率



VSG孤岛判定流程



角速度误差反馈：增大VSG有功环输出的角速度与额定角速度的偏离程度



成功检测孤岛

# 3 分布式电源侧保护问题的阶段性研究进展

## 第二阶段：防孤岛保护问题解决思路

防孤岛问题第二阶段解决目标：实现分布式电源兼具扰动穿越与故障时快速脱网能力

第一阶段未解决的问题

平衡问题

- **难以区分**电压与频率的变化是系统扰动还是孤岛运行造成的。
- **难以兼顾**故障时快速切机与电压频率异常时穿越运行之间的矛盾
  - 过于灵敏会导致系统扰动时DER脱网。国际出现多起DER因系统频率变化大面积脱网造成的大停电事故，如2019年8月9日伦敦大停电。
  - 降低灵敏度，导致反孤岛保护动作速度慢，重合闸延时长，影响供电可靠性。

研究高比例分布式电源接入条件下的涉网保护新原理

- 提出有源配电网保护方法与已有的分布式电源故障穿越控制策略，实现分布式电源的频率/电压穿越能力、防孤岛保护能力与线路故障保护能力三者有机融合，保障含高比例分布式电源的电力系统安全运行与供电可靠性。



# 3 分布式电源侧保护问题的阶段性研究进展

## 第二阶段：防孤岛保护问题解决思路

### 研究配电网故障、系统扰动及孤岛运行状态辨识技术

- 研究同步机电源与高占比逆变型电源并存条件下配电网故障等值模型及特征，明确故障点上下游特别是PCC、POC处的电压、电流等电气量的时频变化规律；
- 研究系统扰动的传播规律及其在分布式电源侧的电气量特征；
- 研究不同类型逆变电源孤岛运行时分布式电源侧电气量的变化特征；
- 研究高比例可再生能源接入条件下配电网故障、系统扰动及孤岛运行工况的辨识方法，给出可区分配电网故障、系统扰动及孤岛运行工况的特征量，并提出三种状态的辨识方法，为配电网故障识别、孤岛检测、系统扰动区分提供可靠的理论依据。



跟网型DG

跟网型逆变电源接入配电网故障等值模型

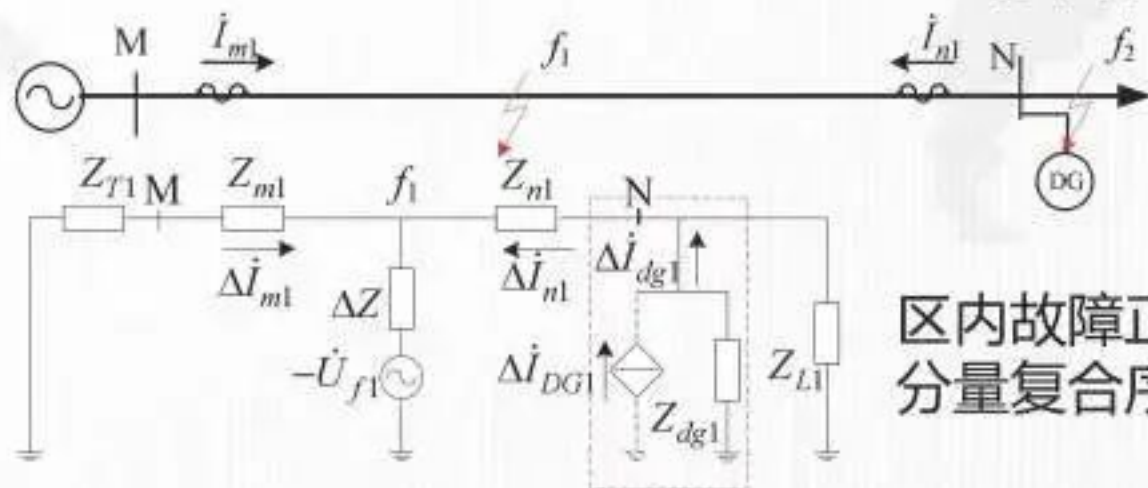


构网型逆变电源控制模型

构网型DG

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{ref} - P}{\omega_{ref}} - D_p (\omega - \omega_{ref}) \\ K \frac{dE}{dt} = Q_{ref} - Q + D_Q (U_{ref} - U) \end{cases}$$

功率外环控制



区内故障正序故障分量复合序网

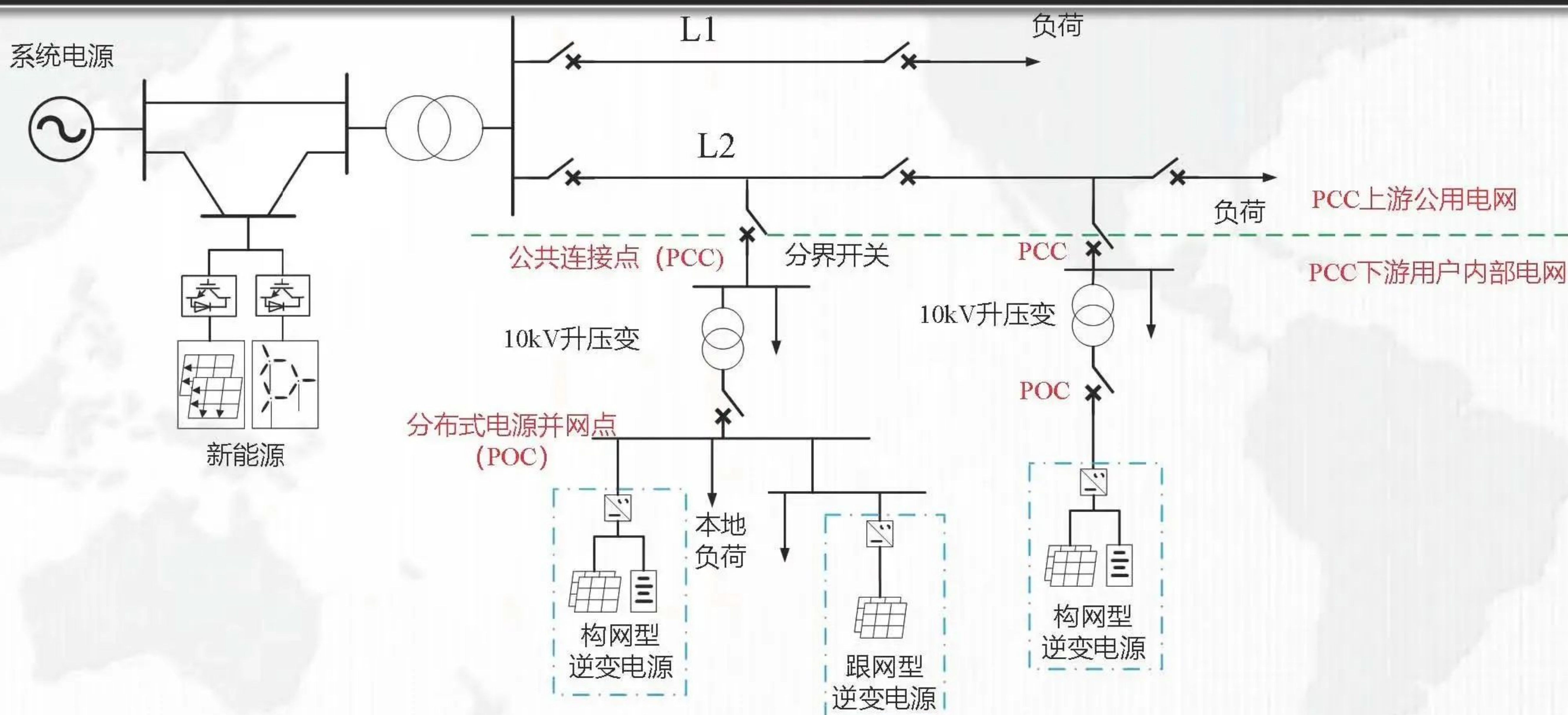
# 3 分布式电源侧保护问题的阶段性研究进展

## 第二阶段：防孤岛保护问题解决思路

### 关键技术5：一种基于故障特征量的防孤岛保护定值自适应配置方法



研究思路

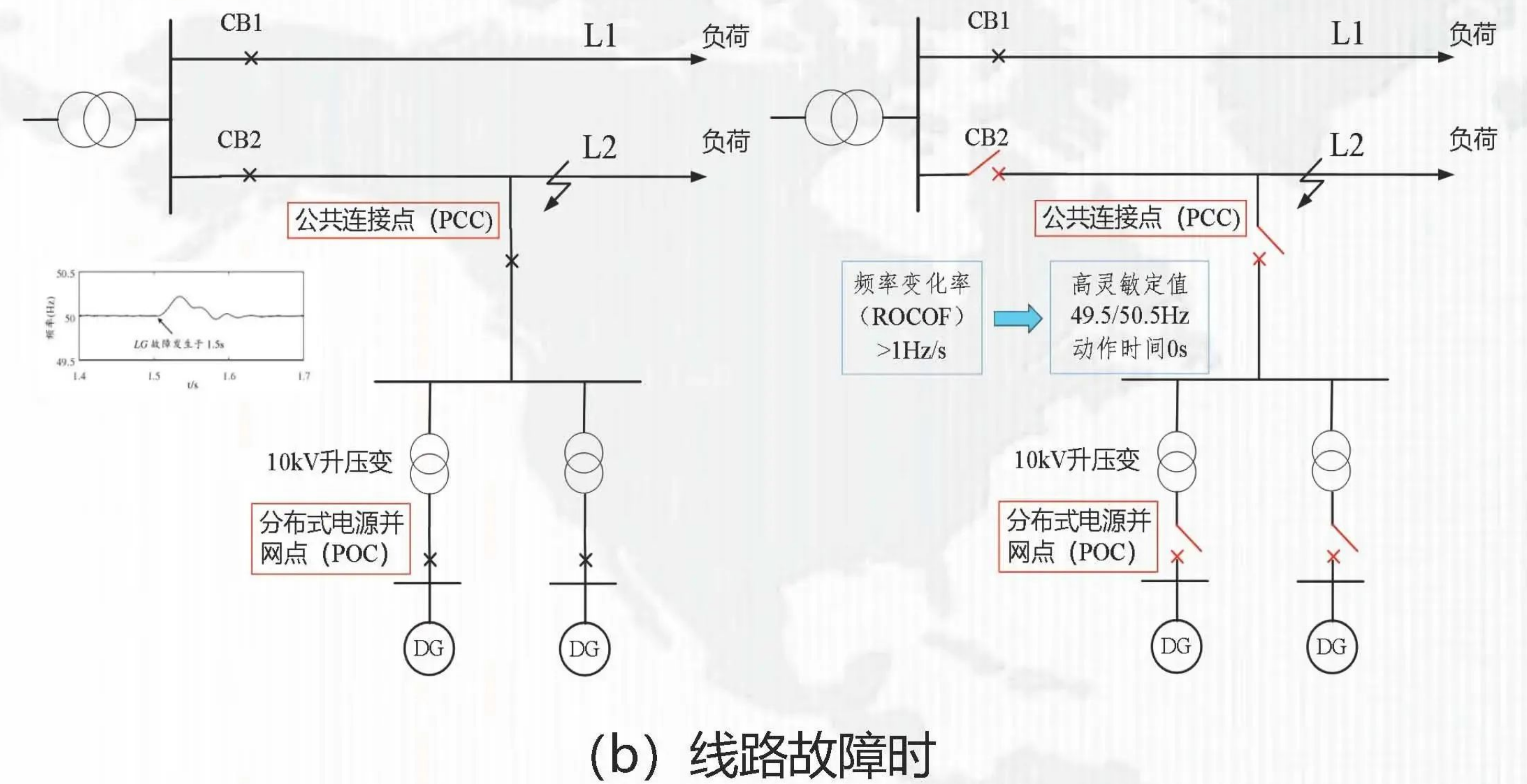
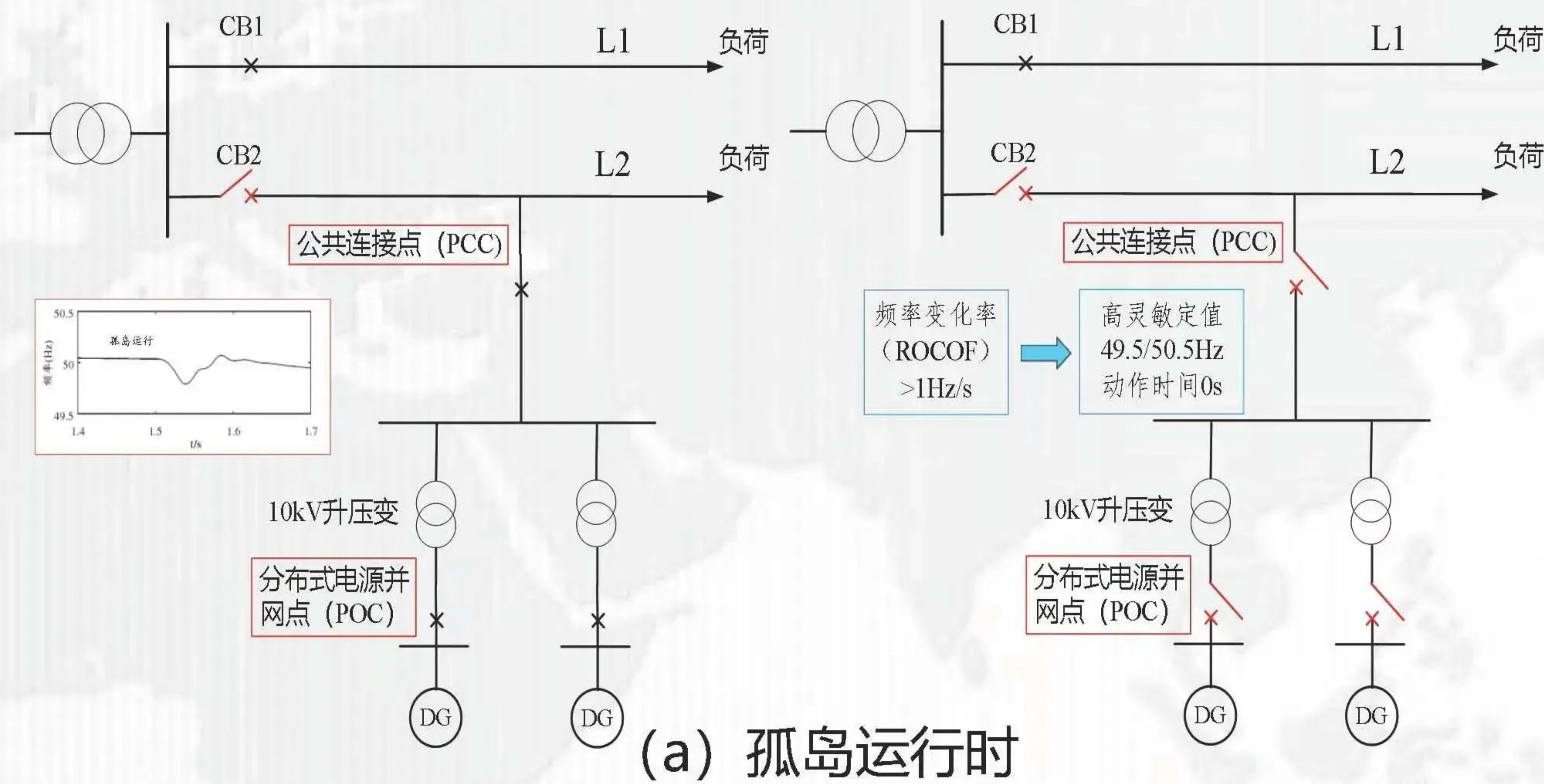


PCC处配置两套定值

- 兼顾DER系统扰动、电网故障频率/电压穿越运行和在配电网本线路故障时快速脱网要求，量化POC和PCC处电压频率特征量变化范围边界，提出一般灵敏度和高灵敏度两套防孤岛保护定值组。高灵敏度定值组在检测到配电网故障时投入，用于快速切除（解列）DER。一般灵敏度定值组应对扰动，保证穿越运行。

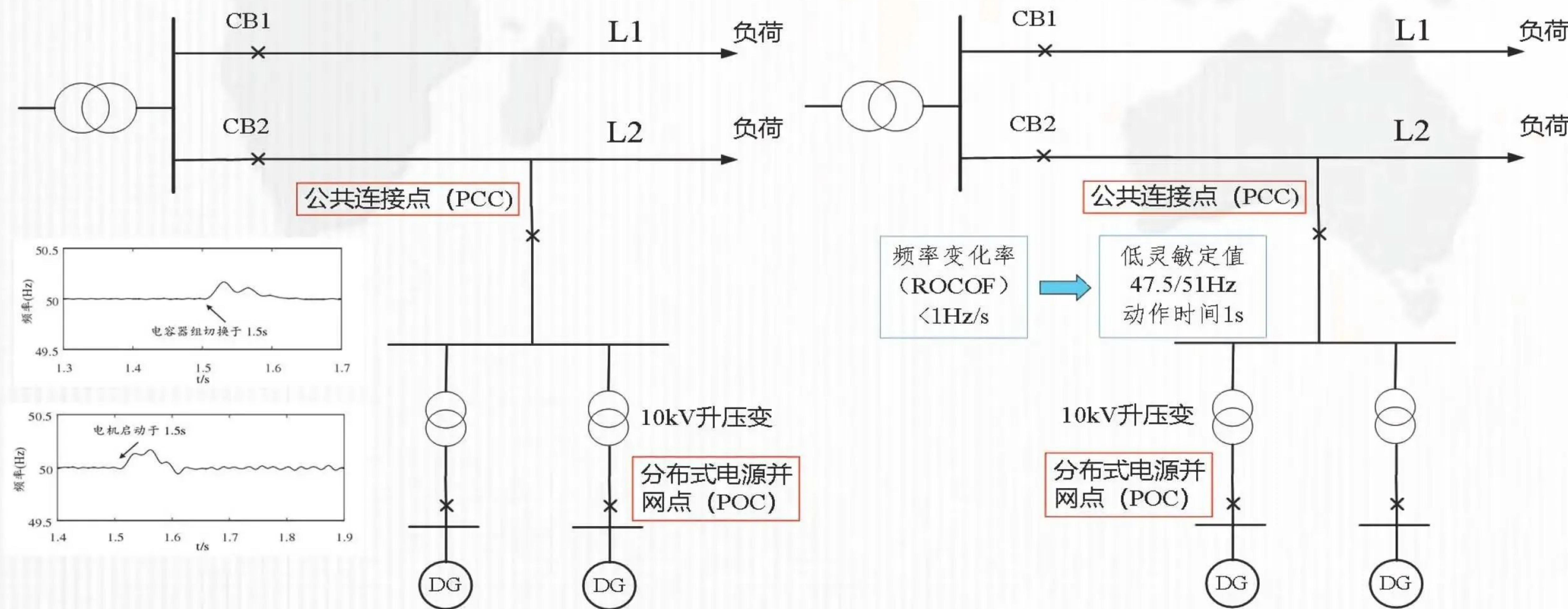
# 3 分布式电源侧保护问题的阶段性研究进展

## 第二阶段：防孤岛保护问题解决思路



## 两套灵敏度定值组解决平衡问题

- **本线路故障或出现孤岛运行时**：根据PCC和POC处频率变化率特点，启动高灵敏频率定值，快速切除并网DG；
- **当系统扰动时**：启动低灵敏频率定值并延时动作，DG短时间内不脱网，具备低电压穿越能力。



# 目录

TABLE OF CONTENTS

01 背景

02 问题的提出

03 阶段性研究进展

04 小结

## 第一阶段

(线路侧保护的可靠动作和分布式电源的可靠脱网)

预计在中短期内，该模式是有源配电网保护主要模式。

### 技术突破

**一是实现了线路继电保护准确动作。**

**技术核心：**以现有保护架构为基础，采用定值整定和方向闭锁元件相结合。

**二是优化了防孤岛保护性能。**

**技术核心：**提升防孤岛保护动作准确性，确保分布式电源可靠脱网且不影响馈线自动化研判。

**三是提升了重合闸成功率。**

**技术核心：**采用检分闸前母线电压自适应调整重合闸时间的方式来提升重合闸成功率。

## 第二阶段

(实现故障后分布式电源最小化脱网)

预计在远期，该模式为适应有源配电网发展的重要精益化、经济化模式

### 技术突破

**一是实现了故障区段的准确识别。**

**技术核心：**基于对等通信技术手段，准确识别出故障区段，实现故障快速精准的定位与隔离。

**二是实现了故障后分布式电源最小化脱网。**

**技术手段：**采取两套防孤岛保护定值组选择性投入，应对扰动时分布式电源的穿越运行，故障和孤岛时分布式电源的快速切除。



**汇报完毕  
谢谢!**