



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

分布式光伏接入对配网保护控制的影响

李 鹏、陈 实

国网江苏电科院

2023年5月18日



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

目录 CONTENTS

01 背景

02 光伏电源故障电流特征

03 光伏对配网保护控制影响

04 工作展望



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

01

背景

背景概述



2020年9月，习近平总书记在联合国大会上提出实现“**双碳**”的愿景目标，二氧化碳排放力争在2030年前达到峰值，2060年前实现碳中和。



2021年3月中央财经委员会第九次会议上，进一步提出推动构建以新能源为主体的**新型电力系统**。



2022年“中央一号文件”、发改委能源局《“十四五”电力发展规划》发布，均强调要推动以**光伏、风电、生物质发电**等分布式电源就近开发消纳，实现多元清洁能源创新发展。

国家能源局于2021年6月20日下发了开展**整县屋顶分布式光伏**开发试点的通知。

国家能源局

国家能源局综合司关于报送整县（市、区） 屋顶分布式光伏开发试点方案的通知

各省（自治区、直辖市）能源局，有关省（自治区、直辖市）及新疆生产建设兵团发展改革委，市县政府，国家能源局派出机构，有关电力公司：

我国建筑屋顶资源丰富，分布广泛，开展建筑屋顶分布式光伏开发试点，开展整县（市、区）屋顶分布式光伏建设，有利于整合资源实现集中开发，有利于降低电力支撑成本，有利于促进电网设备，有利于引导居民绿色能源消费，是实现“碳达峰、碳中和”与乡村振兴两大国家战略的重要途径。

为加快推进屋顶分布式光伏发展，现就整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点工作，有关事项通知如下。

一、申报试点条件

申报整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点的县（市、区）应符合以下条件：

（一）具有比较丰富的屋顶资源，有利于开展整县（市、区）屋顶分布式光伏开发。



比例不低于**50%**

党政机关建筑屋顶



比例不低于**40%**

学校、医院等公共建筑屋顶



比例不低于**30%**

工商业厂房屋顶



比例不低于**20%**

农村居民屋顶

02

光伏电源故障电流特征



2.1 分布式光伏接入配电网对故障电流影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 分布式光伏接入配电网对故障电流影响因素

- 光伏接入容量
- 光伏接入位置
- 光伏电源结构及控制策略
- 逆变器短路电流能力
- 逆变器类型及其运行要求
 - 电压、频率适应性
 - 低电压穿越
 - 孤岛运行要求,

受线路载流容量、
配变容量等限制

光伏电源的故障
电流特征主要取
决于**逆变器特性**

◆ 相关标准规范

- NB/T 32004-2018 光伏并网逆变器技术规范;
- GB/T 37408-2019 光伏发电并网逆变器技术要求;
- GB/T 29319-2012 光伏发电系统接入配电网技术规定;
- Q/GDW 11147-2013 分布式电源接入配电网设计规范;
-





2.1 分布式光伏接入配电网对故障电流影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 分布式光伏逆变器类型

集中式

集中式光伏发电系统

- 利用相对稳定的太阳能资源构建中大型光伏电站，通过高压输电系统外送；
- **A类逆变器***：通过35kV及以上电压等级接入电网，或通过10kV及以上电压等级**与公共电网连接的光伏电站**所用光伏逆变器；

分布式

分布式光伏发电系统

- 主要基于建筑物表面，就近解决用户的用电问题，主要在户用以及工商业建筑屋顶；
- **B类逆变器***：通过220V/380V电压等级接入电网，以及通过10kV及以下电压等级**接入电网用户侧的光伏发电系统**所用光伏逆变器；

* 行标《NB

更多免费行业报告

并购家

www.ipoiipo.cn



2.1 分布式光伏接入配电网对故障电流影响

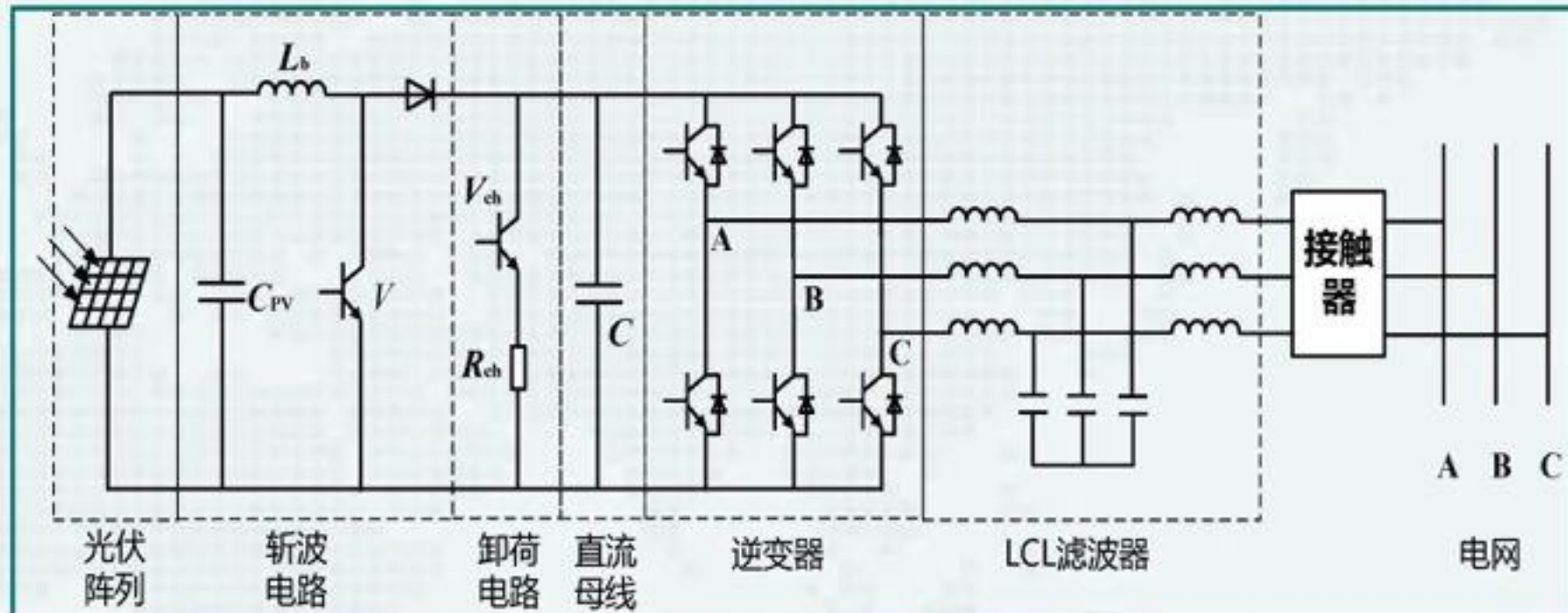


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 分布式光伏电源结构及控制策略

- **双级式组串逆变器**：直流侧由若干串光伏组件并联，每个光伏组串由几块或十几块光伏电池板串联形成。
- **DC/DC电路**：控制光伏组串输出电压，实现最大功率点跟踪。一般1-2串光伏组件配一路MPPT跟踪电路。
- **LCL滤波器**：对高频谐波有较强的抑制能力，并且受并网阻抗的影响较小。
- **接触器**：用于逆变器并网和脱网。逆变器检测到两端电压大小、相位、频率和相序一致，发令闭合接触器并网，监测到电网电压异常或孤岛运行时，跳开接触器使逆变器脱网。
- **逆变器控制**：双环解耦控制，内环采用基于正、负序分离的电流控制器，**负序电流抑制**。



*直流EMI滤波器和交流EMI滤波器图中未标明。



2.1 分布式光伏接入配电网对故障电流影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 光伏逆变器提供短路电流能力

- 《Q/GDW 617—2011光伏电站接入电网技术规定》第8.1 “过流与短路保护” 规定：“当检测到电网侧发生短路时，光伏电站向电网输出的短路电流应**不大于额定电流的150%。**”
- 《Q/GDW 11147—2013 分布式电源接入配电网设计规范》第5.4 “短路电流计算” 规定：“分布式变流器型发电系统提供的短路电流**按1.5倍额定电流计算。**”
- 《江苏省分布式光伏接入配电网技术指导意见》第2.3.6 “并网逆变器” 规定：当电网短路时，逆变器的**过电流应不大于额定电流的150。**

在后续分析中分布式光伏电源提供的最大短路电流以1.5倍额定电流计算。



2.1 分布式光伏接入配电网对故障电流影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 光伏逆变器电压/频率运行区间

参照《NB/T 32004-2018 光伏并网逆变器技术规范》

➤ 第8.3.4 电压适应性规定：

- **A类逆变器**电压运行范围要求如表1所示。
- **B类逆变器**并网点电压在 $0.85U_N - 1.1U_N$ 之间时，应能正常运行。（**B类逆变器未作低电压穿越要求**）

表1 A类逆变器电压运行范围要求

电压范围	运行要求
$U < 0.9U_N$	应符合低电压穿越要求
$0.9U_N \leq U \leq 1.1U_N$	应正常运行
$1.1U_N < U < 1.3U_N$	应符合高电压穿越要求

➤ 第9.1.2 交流输出侧过/欠电压保护规定：

- **B类逆变器**并网点电压在表2电压范围内时，应在相应时间内停止向电网线路输电，此要求适用于多相系统中的任何一相。

表2 B类逆变器交流过/欠电压保护要求

电网电压（电网接口处）	要 求
$U < 0.5U_N$	最大分闸时间不超过0.2s
$0.5U_N \leq U < 0.85U_N$	最大分闸时间不超过2.0s
$0.85U_N \leq U < 1.1U_N$	连续运行
$1.1U_N \leq U < 1.35U_N$	最大分闸时间不超过2.0s
$1.35U_N \leq U$	最大分闸时间不超过0.2s

➤ 第9.2 过/欠频保护规定：

- **B类逆变器**并网点频率超过47.5~50.2Hz范围时，应在0.2s内停止向电网送电。



2.1 分布式光伏接入配电网对故障电流影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 光伏逆变器防孤岛要求

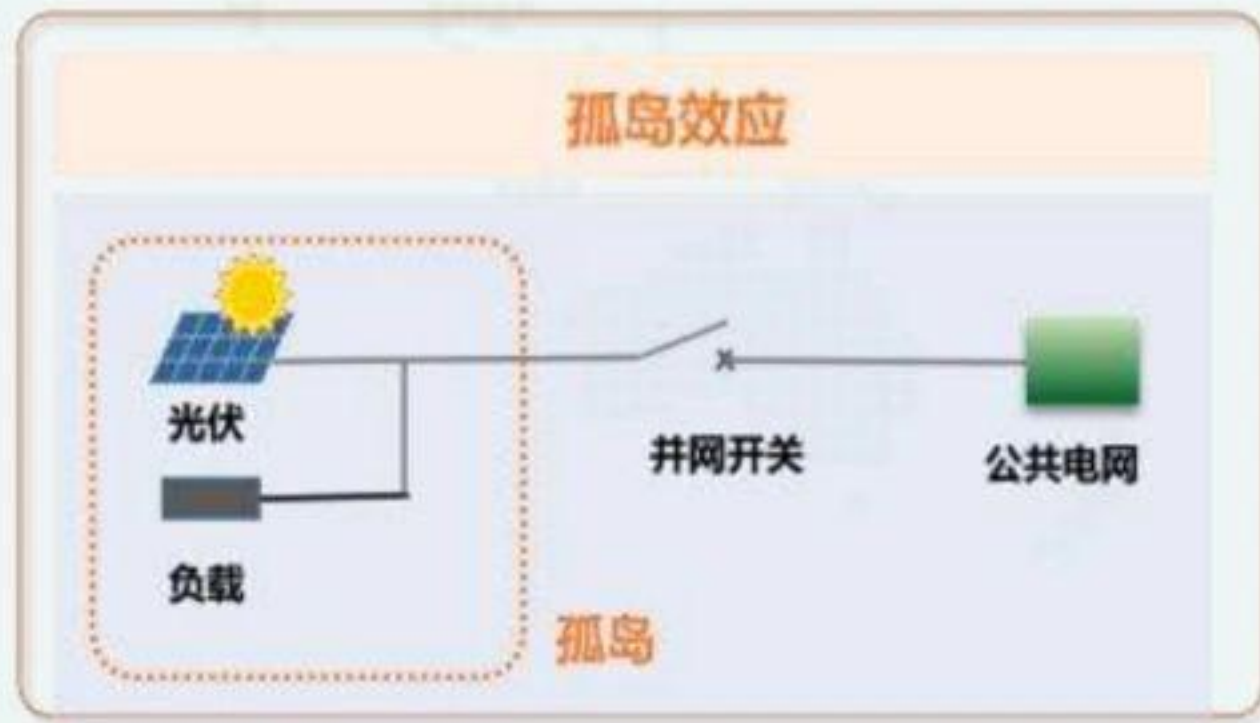
参照《NB/T 32004-2018 光伏并网逆变器技术规范》

➤ 第9.7 防孤岛效应保护规定：

- **B类逆变器**，应具备快速监测孤岛且立即断开与电网连接的能力，防孤岛保护动作时间应不大于**2s**，同时发出警示信号，且孤岛保护还应与电网侧线路保护相配合。
- **A类逆变器**未作防孤岛保护要求。

➤ 防孤岛保护方案分为**主动式保护**和**被动式保护**。

- **被动式保护**：通过检测逆变器交流输出端电压或频率的异常来检测孤岛效应。
- **主动式保护**：通过引入扰动信号来监控系统中电压、频率等变化，确定是否同电网连接。
- **光伏逆变器应至少设置一种主动和被动式防孤岛保护。**





2.2 光伏逆变器性能试验

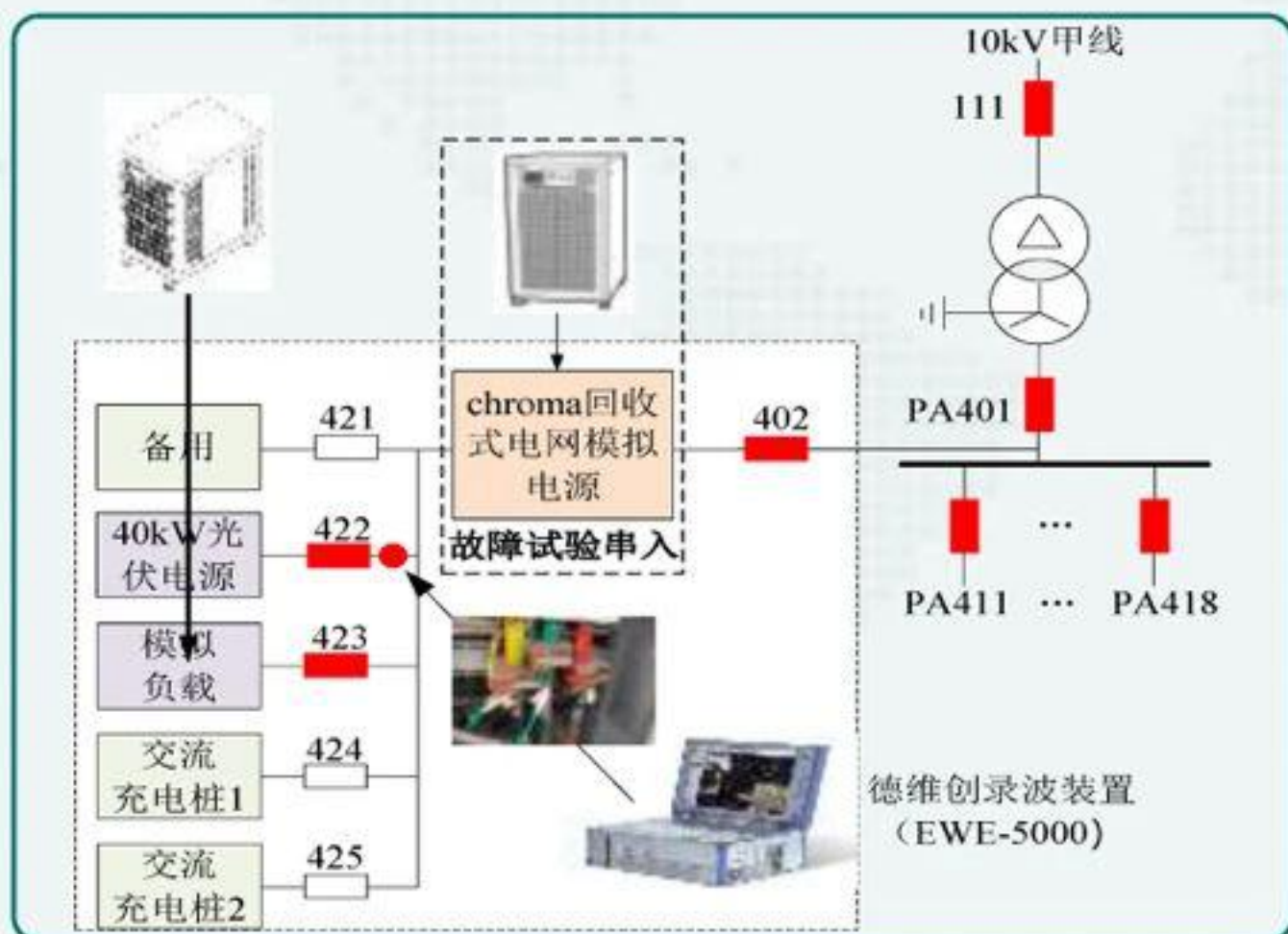


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

利用江苏电科院**园区内配电楼楼顶光伏**进行现场光伏电源性能及故障特征测试。

- **测试系统：** 配电楼屋顶光伏接入422开关，接入400V系统，模拟负载接入423开关，德维创DEWE-5000采集光伏并网点电压和电流，在402开关下游串入**Chroma回收式电网模拟电源**来模拟电网故障。



□ 测试项目

- 光伏并网试验
- 孤岛运行试验

打开402开关模拟光伏逆变器孤岛运行。

- 故障试验（电压跌落试验）

调节Chroma三相输出电压降低、A相电压降低，模拟电网三相及单相故障电压跌落。



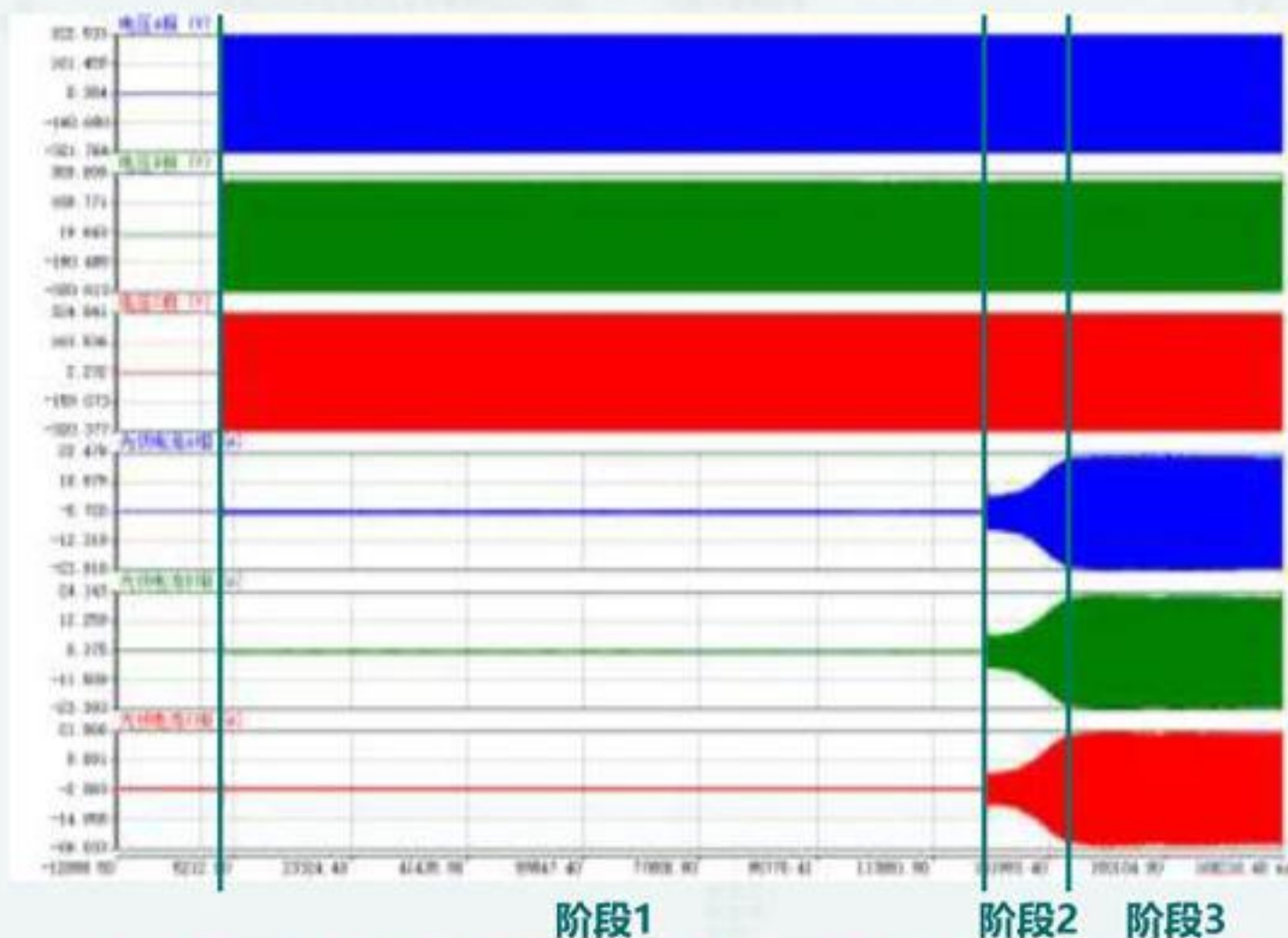
2.2 光伏逆变器性能试验



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ **光伏并网试验：** 合上并网开关，光伏逆变器输出的电流波形。



▲ 并网点电压和光伏电源输出电流波形

- 0时刻，光伏并网；
- 约2min后，光伏开始输出三相电流，电流并逐渐变大；
- 约15s后，光伏开始输出稳定的三相电流。

光伏并网分为两个阶段：1) **启机阶段**，时长约120s；2) **并网阶段**，约15s左右。



2.2 光伏逆变器性能试验



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 孤岛运行试验：打开402开关模拟光伏逆变器孤岛运行

序号	负载模式	负载功率/光伏出力	光伏电流消失时间/ms	光伏电流频率变化/Hz
1	定电阻模式	20%	15	/
2		60%	91	变快/87.7
3		105%	105	变快/103
4		150%	136	变快/90.9
5		190%	107	变快/91.7
6		98.4%	95	变快/94.3
7	定功率模式	51.7%	86	电流畸变
8		100%	93	电流畸变
9		145%	85	电流畸变
10		199%	15	/

孤岛情况下：

- 光伏电源快速脱网，**最长脱网时间**不超过140ms；
- 光伏电源输出**电流频率变大**，光伏电源脱网前频率升高至**90-100Hz**左右，超过了光伏电源逆变器能够运行的频率区间；



2.2 光伏逆变器性能试验

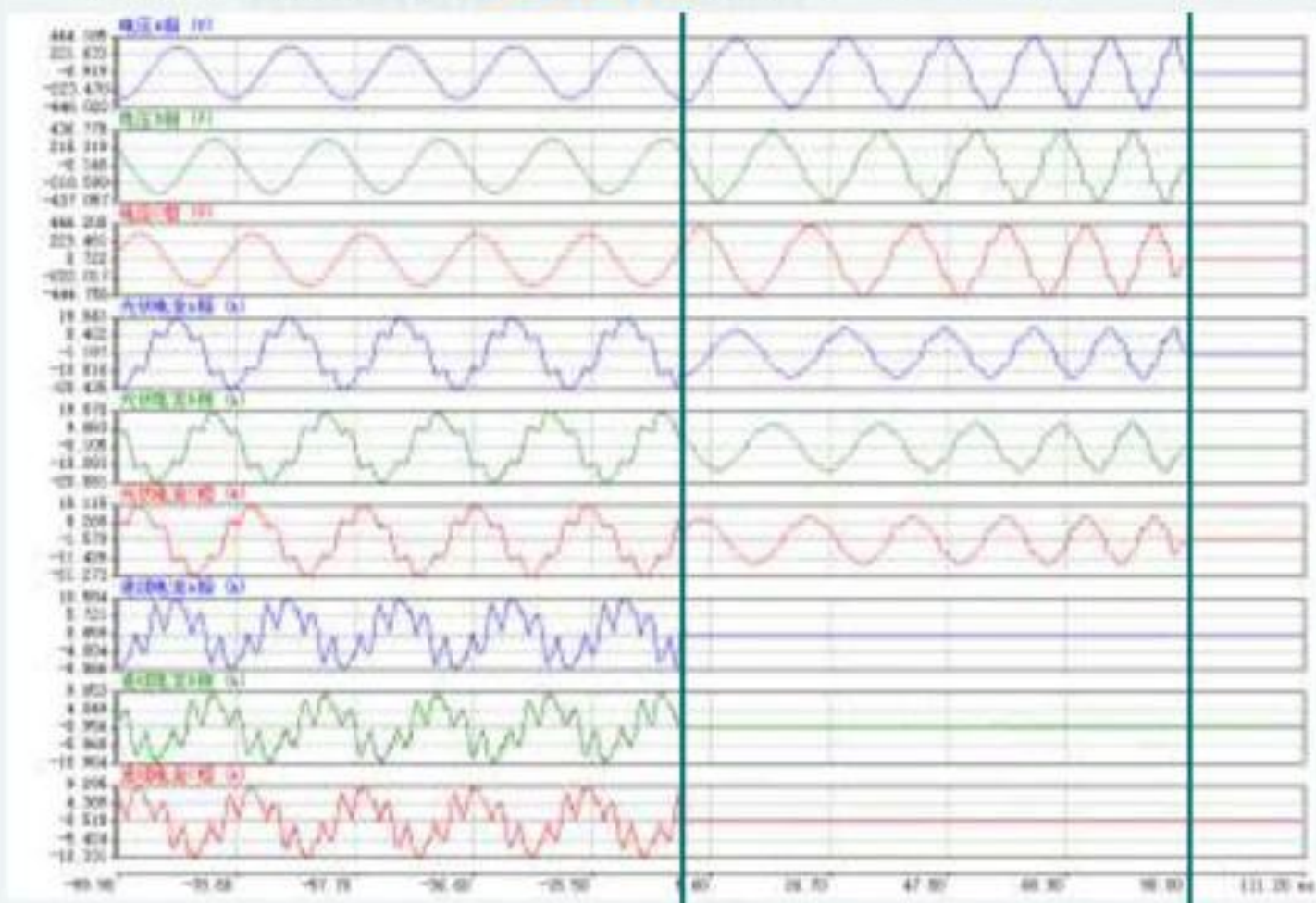


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 孤岛运行试验

模拟负载处于**定电阻**模式（负载 32Ω ），负载功率/光伏逆变器输出功率**60%**；



并网开关分闸 孤岛状态 光伏彻底脱网

▲ 并网点电压、光伏电源和进线开关电流波形

- 光伏电源**倒送**，三相负载为4945W，光伏逆变器输出功率为8372W；
- 402开关拉开后，进线电流立即消失；
- **91ms**后光伏电流衰减至0，孤岛期间，光伏电流**频率越来越快**，脱网约88Hz；



2.2 光伏逆变器性能试验



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ **故障试验：** 利用Chroma模拟电网三相及单相故障电压跌落。

序号	电压跌落相别/电压值	光伏输出功率	脱网时间
1	ABC/90%Un	不变	不脱网
2	ABC/85%Un	不变	1.971s
3	ABC/80%Un	不变	1.969s
4	ABC/60%Un	不变	1.957s
5	ABC/50%Un	不变	164ms
6	ABC/40%Un	不变	163ms
7	ABC/20%Un	不变	165ms
8	A/90%Un	不变	不脱网
9	A/80%Un	不变	1.973s
10	A/50%Un	不变	179ms
11	A/20%Un	不变	176ms
12	BC/90%Un	不变	不脱网

- 电网电压跌落严重时，光伏电源脱网，脱网时间符合NB/T 32004-2018 规定；
- 受试验当日天气状况限制，故障电流均未超过光伏电源额定电流，故障前后功率不变。



2.2 光伏逆变器性能试验

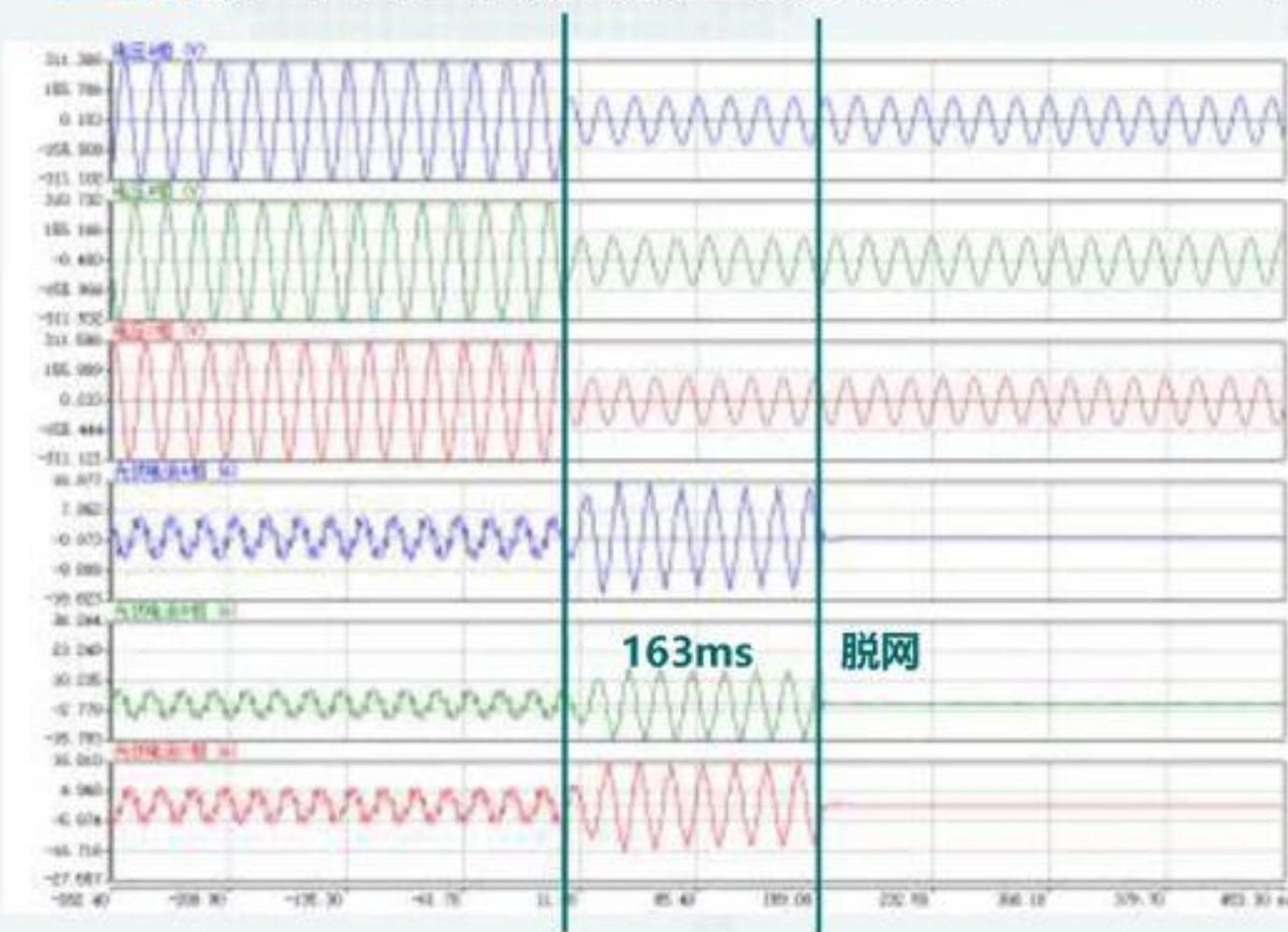


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 故障试验

三相输出电压幅值为正常情况下**40%**，光伏逆变器并网点处电压和光伏输出电流；



	电压/V	A相电流/A	B相电流/A	C相电流/A
跌落前	220	3.996	3.993	4.010
跌落后	88	9.794	9.790	9.771

- 光伏电源三相电流增大为电压跌落前的2.452倍；
- 电压跌落前后光伏电源**输出功率保持不变**；
- 电压跌落**0.163s**后，光伏电源脱网。

▲ 并网点电压、光伏输出电流波形



2.3 光伏逆变器动模试验

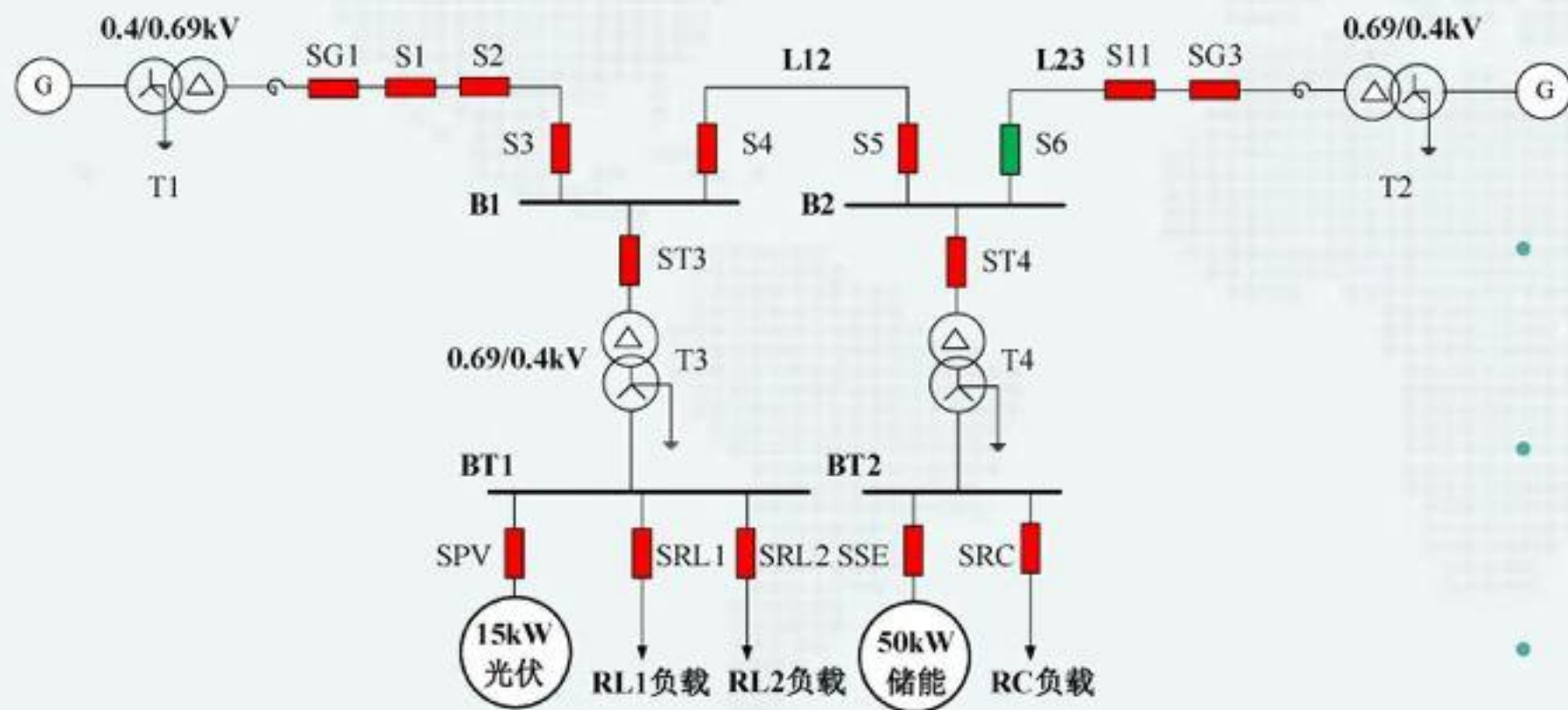


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

利用宿迁公司**真型试验场动模平台**开展了光伏**并网试验**、**故障试验**、**孤岛运行**等试验。

- **试验系统：**光伏通过开关SPV接入BT1母线，BT1母线下形成一个配电台区；配变T3、T4容量50kVA，变比0.69kV/0.4kV；主变T1、T2容量160kVA，变比0.4kV/0.69kV。



- 光伏模拟器由**太阳能电池模拟器**和**光伏并网逆变器**两部分组成；
- 太阳能电池模拟器模拟不同温度及照度下的I-V曲线；
- 光伏并网逆变器为三相无变压器组串型逆变器，额定功率为3*15kW。

▲ 动模仿真平台拓扑结构



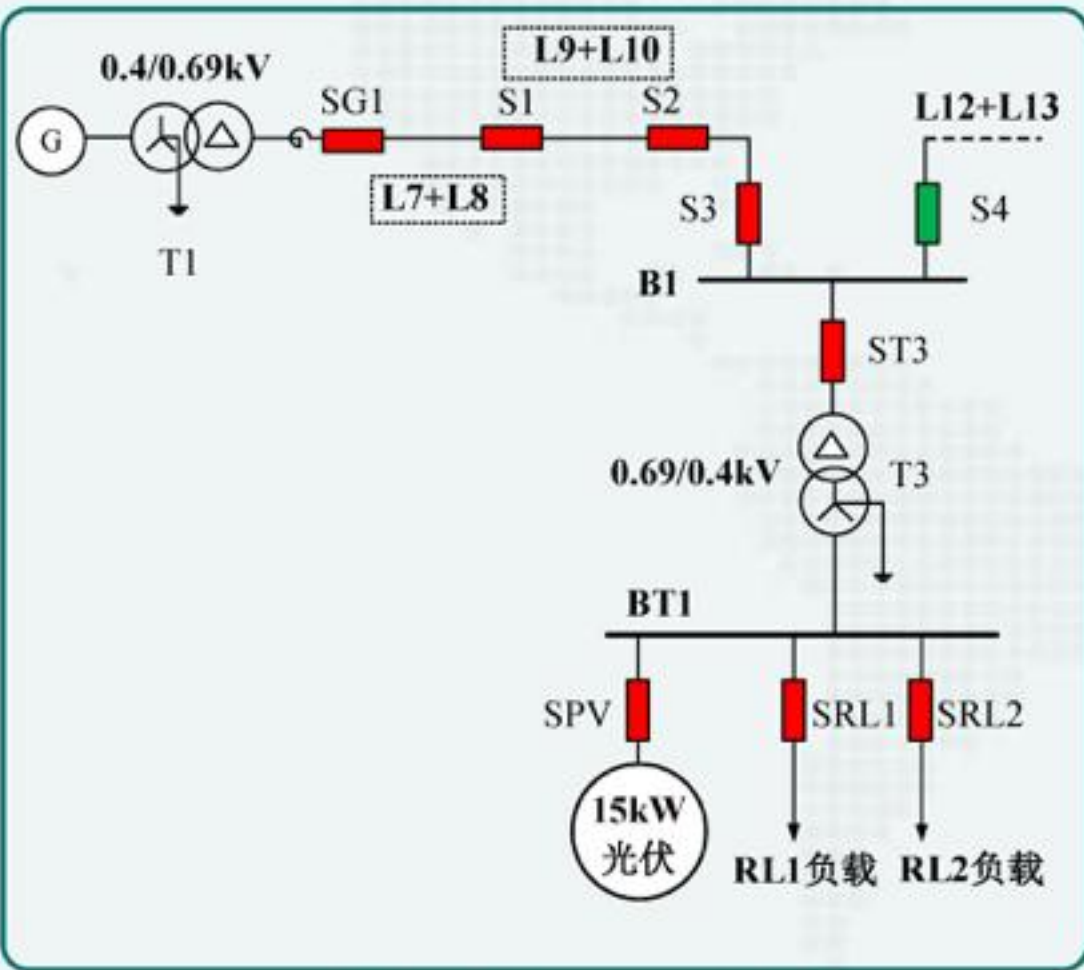
2.3 光伏逆变器动模试验



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ **故障试验：** 开关S4处于分闸状态，开关SRL1、SRL2、SPV处于合闸状态；不同光伏出力及负载下，在**母线B1**设置不同类型故障。



▲ 故障试验运行方式图

故障试验结果

序号	故障类型	光伏出力/kW	负载/kW	B1电压跌落/Un	故障时间/s	光伏功率变化	输出故障电流	脱网时间/s
1	AG	13	20	0.3	/	无变化	无影响	未脱网
2	BC	13	10	0.6	0.3	无变化	正序, 增至1.14pu	未脱网
3	BC	13	10	0.3	0.4 0.55	减小 减小	正序, 限幅1.4pu 正序, 限幅1.4pu	未脱网 0.49
4	BC	13	13	0.3	0.55	减小	正序, 限幅1.4pu	0.49
5	BC	13	20	0.3	0.55	减小	正序, 限幅1.4pu	0.48
6	BCg	13	20	0.43	0.55	无变化	正序, 增至1.22pu	未脱网
7	BC	7	4	0.3	0.55	无变化	正序, 增至0.78pu	0.46
8	BC	7	7	0.6	0.55	无变化	正序, 增至0.6pu	未脱网
9	BC	7	15	0.95	0.55	无变化	正序, 增至0.5pu	未脱网
10	BC	4	10	0.3	0.55	无变化	正序, 增至0.4pu	0.47



2.3 光伏逆变器动模试验



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

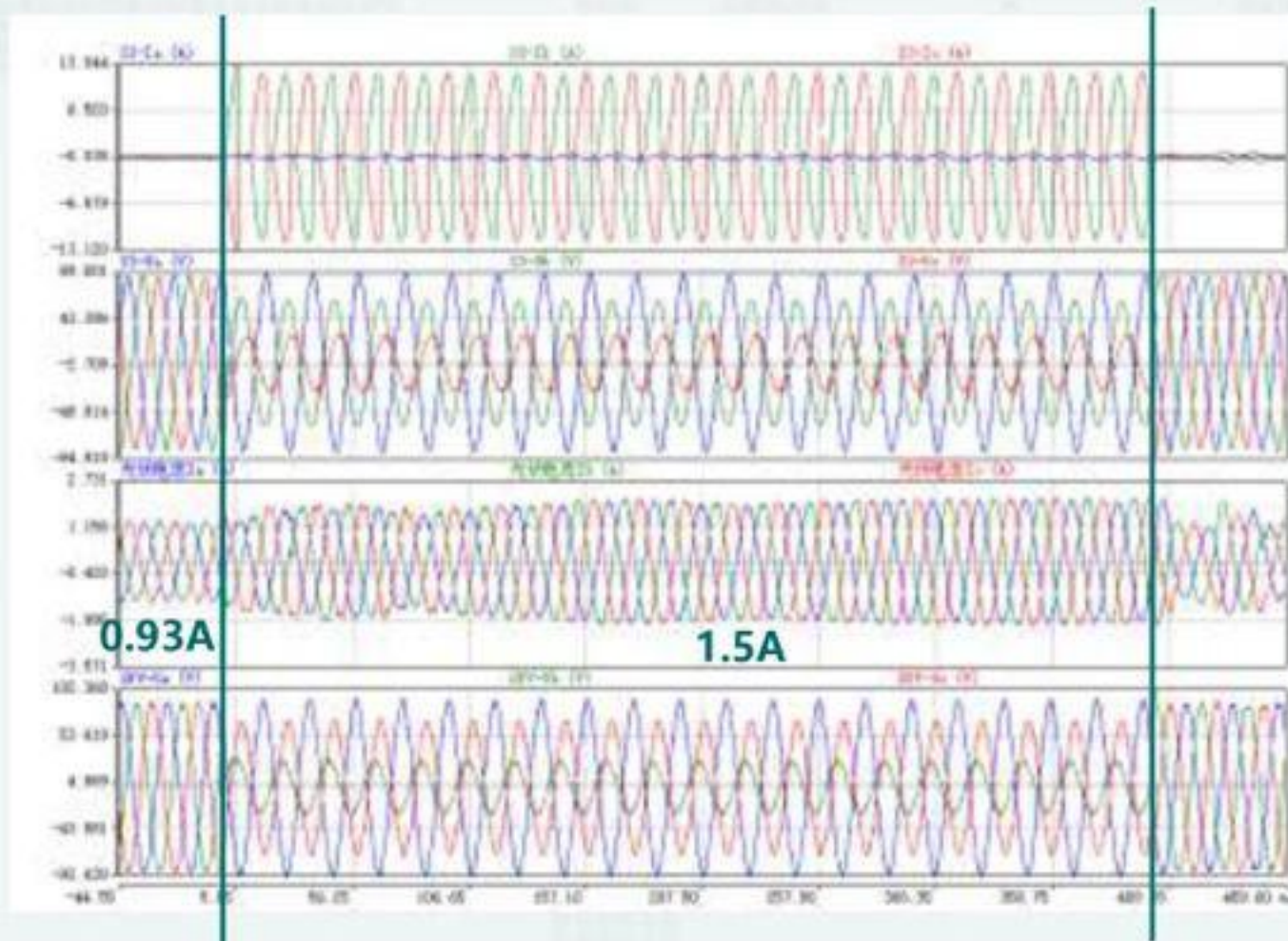
◆ **故障试验：试验3)** 光伏出力13kW，负载10kW，B1母线BC故障，电压跌落至 $0.3U_N$ 。

S3-I ▶

S3-U ▶

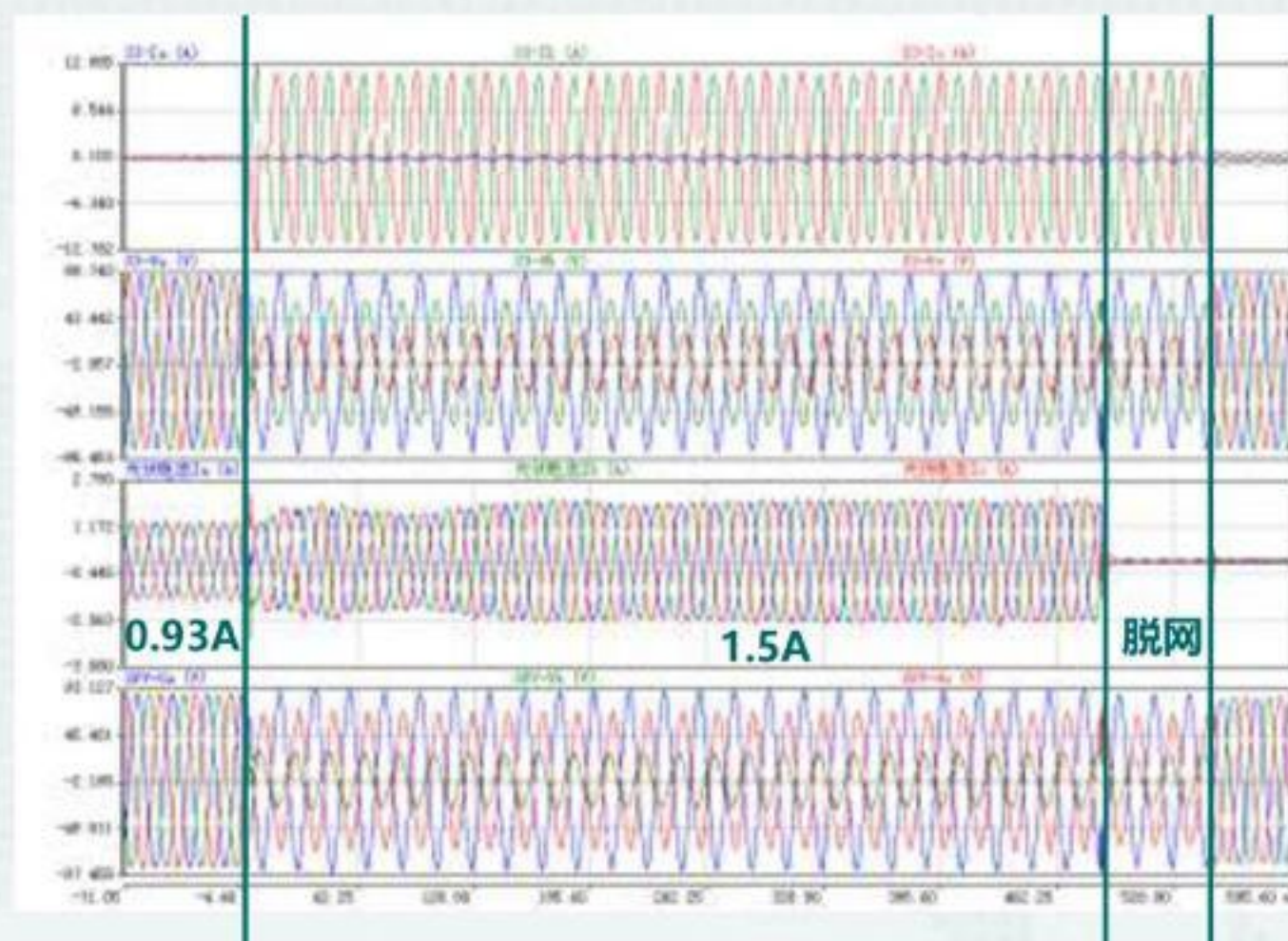
SPV-I ▶

SPV-U ▶



▲ S3和SPV处电压、电流（故障持续0.4s）

□ 光伏电源**未**脱网，输出**1.4倍**额定电流（二次1.05A）的**正序**短路电流；



▲ S3和SPV处电压、电流（故障持续0.55s）

□ **487ms**光伏电源**脱网**，输出**1.4倍**额定电流（二次1.05A）的**正序**短路电流；



2.3 光伏逆变器动模试验

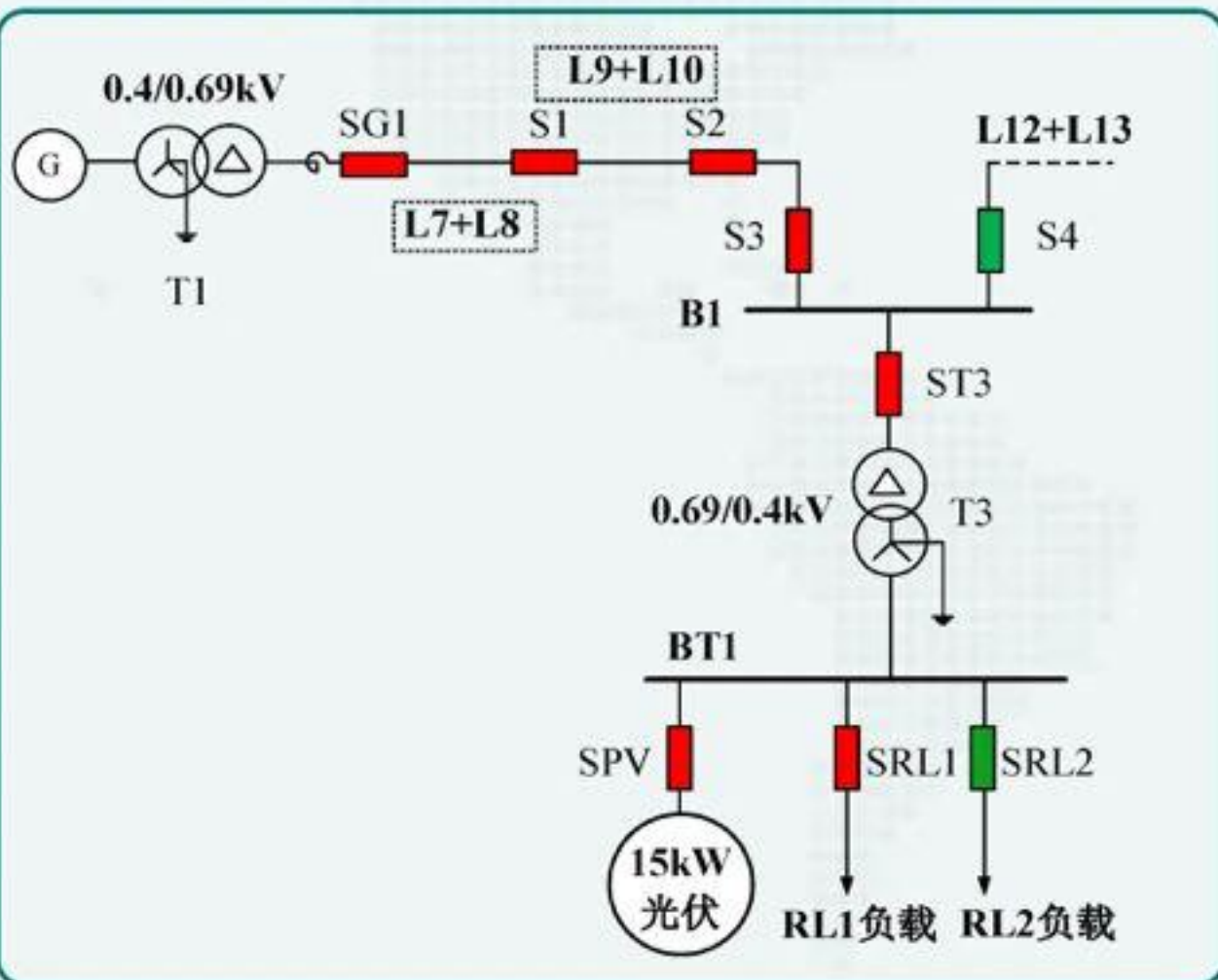


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 孤岛运行试验

分别设置光伏电源不同出力以及不同负载情况，拉开开关ST3；



▲ 孤岛试验运行方式图

孤岛运行试验结果

序号	光伏电源 (kW)	RL1负载 (kW)	光伏电流消失 时间/ms	光伏电流最 大频率/Hz
1	4	10.96	203	90-100Hz
2	10.17	10.14	181	
3	10.17	5	立即脱网	
4	10.17	8.42	185	

- 不同光伏电源与负载出力占比下，均未形成稳定孤岛；
- 脱网时间在180-200ms左右；
- 光伏电流频率越来越大，最大至90-100Hz。



2.4 光伏逆变器动模试验



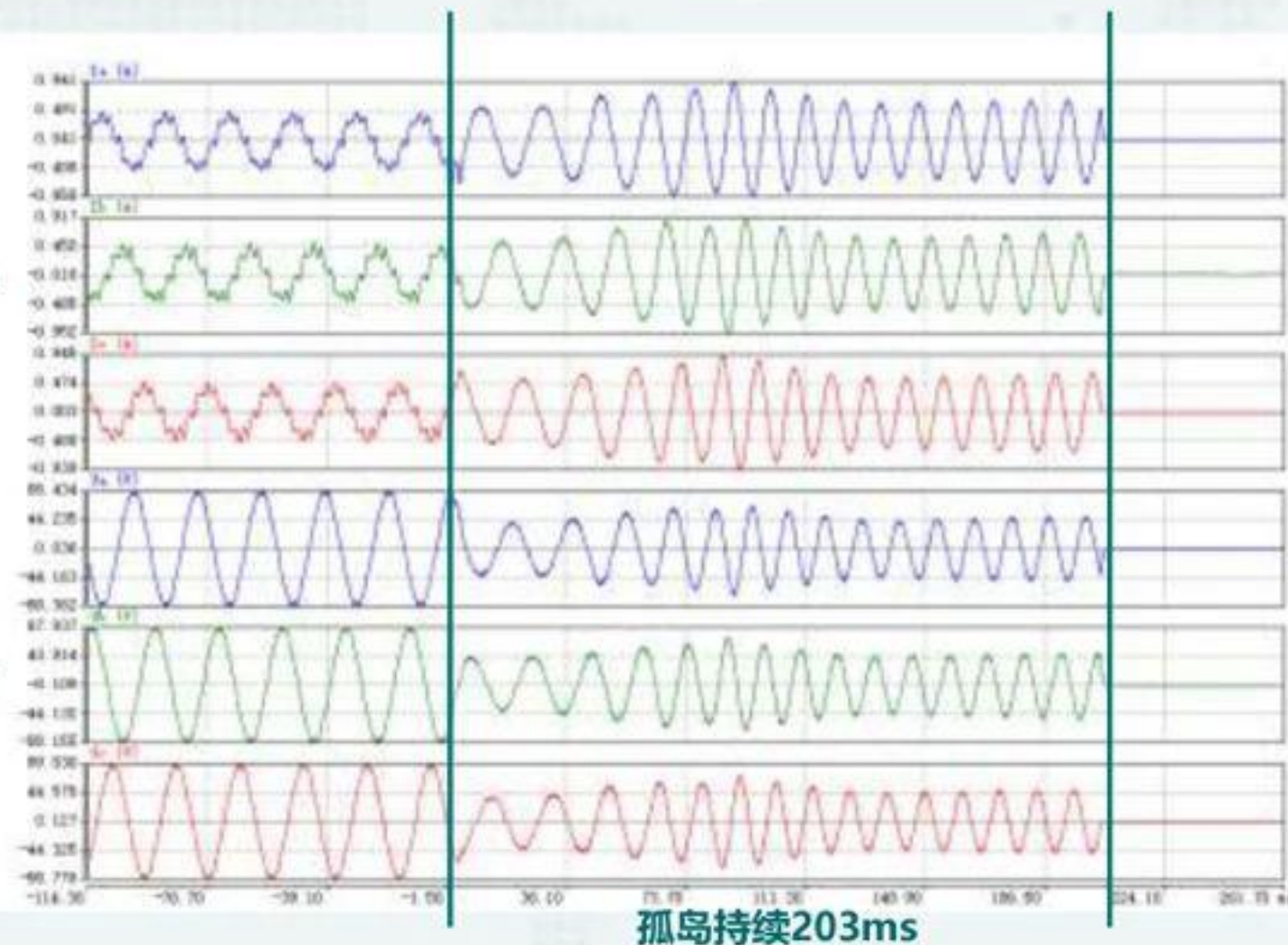
国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

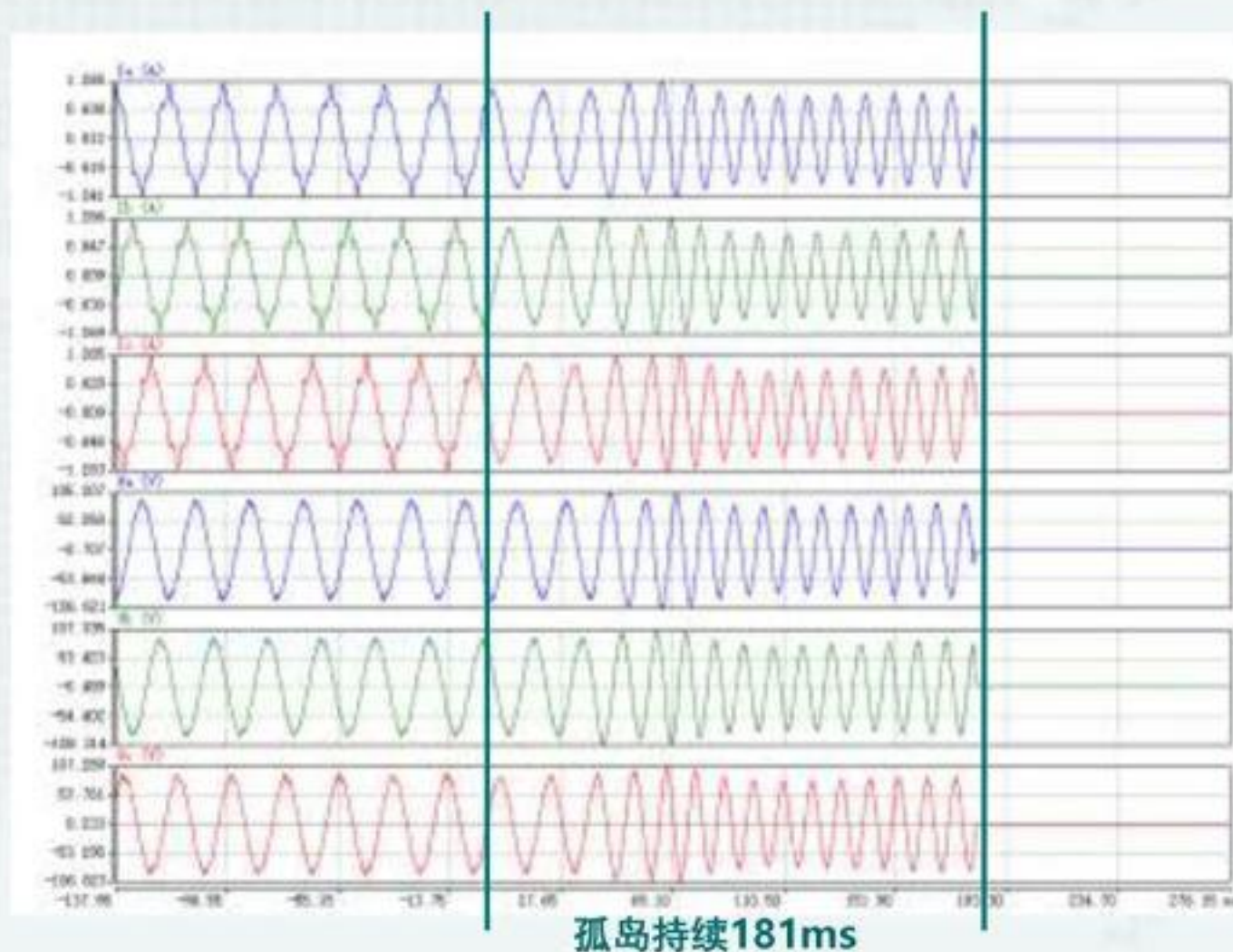
◆ 孤岛运行试验

SPV-I ▶

SPV-U ▶



试验1) 光伏4kW, 负载10.96kW



试验2) 光伏10.17kW, 负载10.14kW



◆ 试验情况总结

- 光伏并网分两个阶段：1) **启机阶段**，时长约90~120s；2) **并网阶段**，约7~15s。
- 并网点电压跌落较大时，光伏逆变器输出**短路电流受限**（1.1~1.5倍额定电流），光伏脱网时间受并网点电压跌落深度决定，不超过2s。
- 故障期间，逆变器输出电流为**正序**，正序电压跌落较小时，输出电流达不到限值，且可保持光伏电源输出功率不变。
- 在天气状况不佳或**光伏出力较小**的情况下，光伏电源输出的短路电流可能达不到逆变器额定电流或限值。
- 不同光伏电源与负载出力下，**均未形成稳定孤岛**，脱网时间不超过200ms左右（防孤岛保护动作时间小于2s）。

03

光伏接入对配网保护控制影响



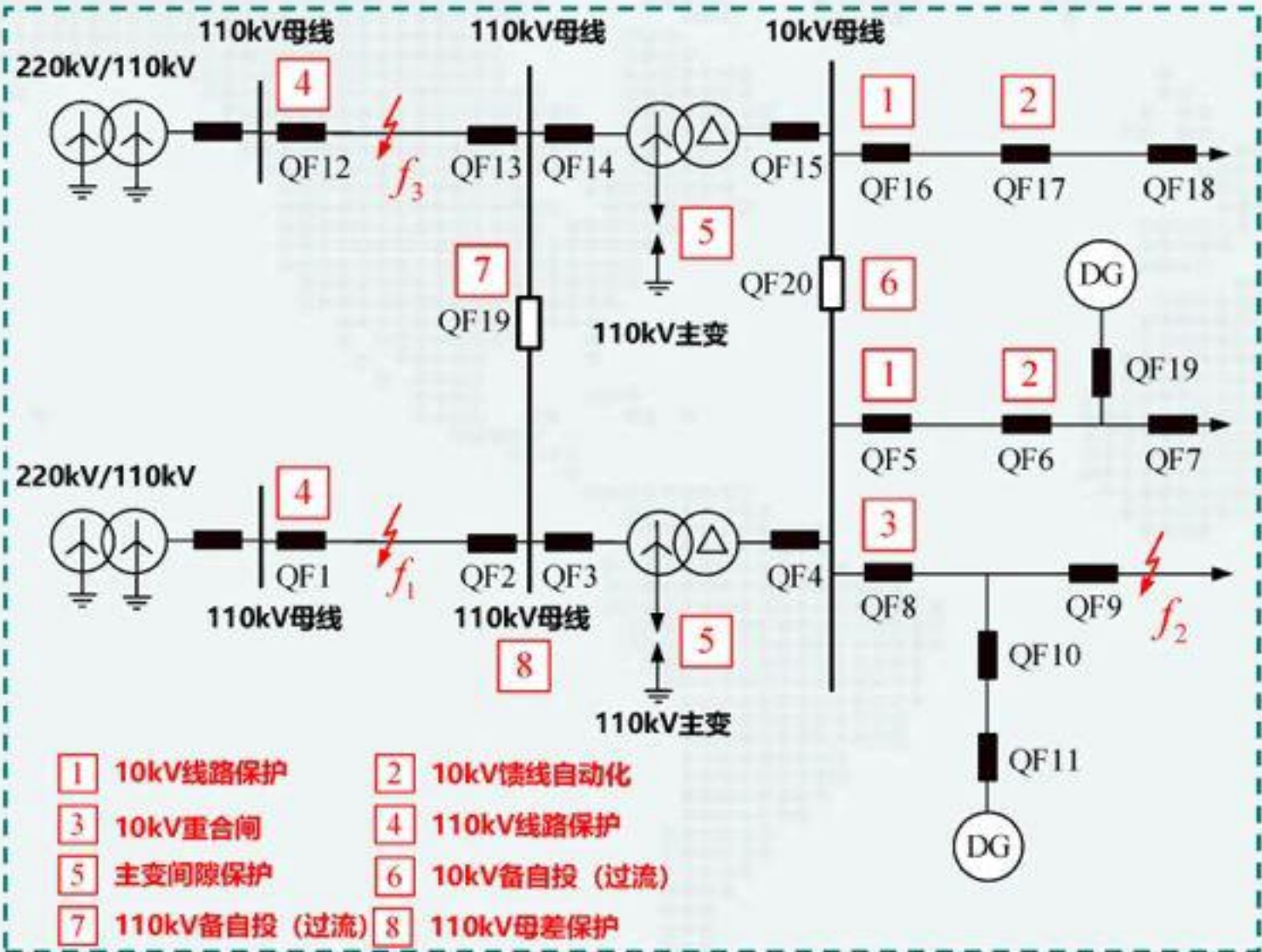
3.1 配电网保护典型配置



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 配网保护典型配置



保护类型	典型配置方式
10kV线路保护	● 配置三段式电流保护; ● I、II段保护定值1000A以上; ● 过负荷保护定值取1.2In (最小)。 ● 两段零序过流保护。(小电阻接地)
10kV线路重合闸	● 无检定三相一次重合闸; ● 常规线路重合闸时间: 1.1~1.4秒; ● 含光伏电源重合闸时间: 2.5~5秒。
110kV线路保护	● 通常电源侧配置距离、零序电流、过负荷保护, 部分配置光纤差动保护; ● 仅跳开电源侧开关。
110kV变压器保护	● 差动保护作为主保护, 配置高、中、低后备保护以及非电量保护; ● 间隙保护利用零序电压和间隙零序电流构成。

- 大量分布式光伏并网后, 配电网由辐射型电网变成多端有源网络, 光伏电源向故障点提供短路电流, 会出现反向故障电流、助增和外汲现象以及故障点电压时间延长等, 对继电保护带来影响。



3.1 配电网保护典型配置



国家电网
STATE GRID

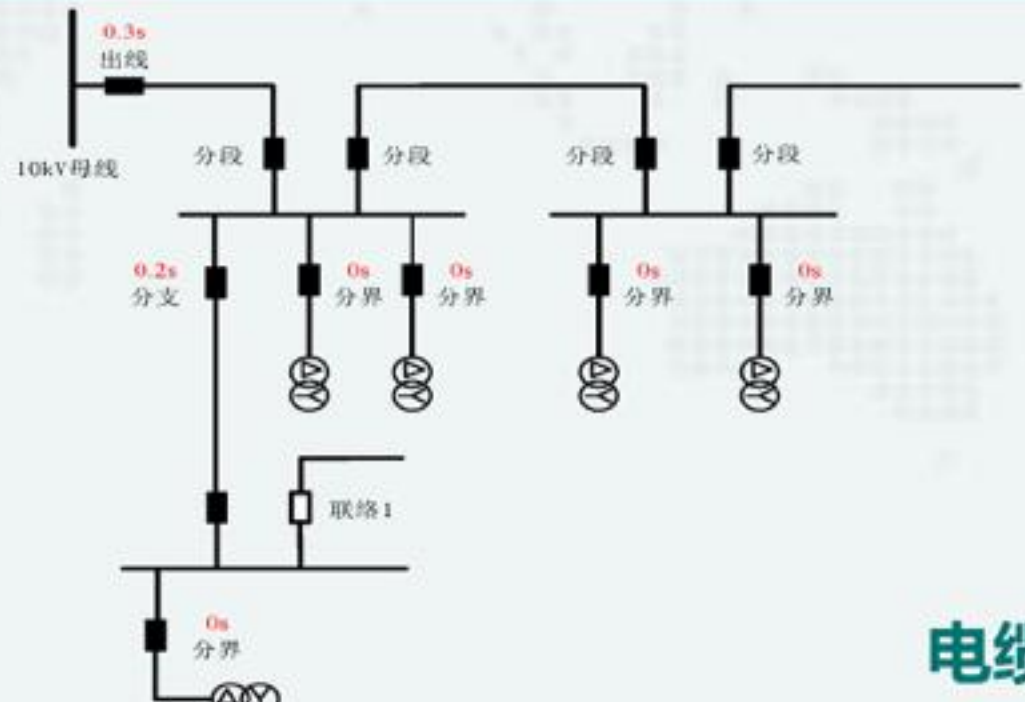
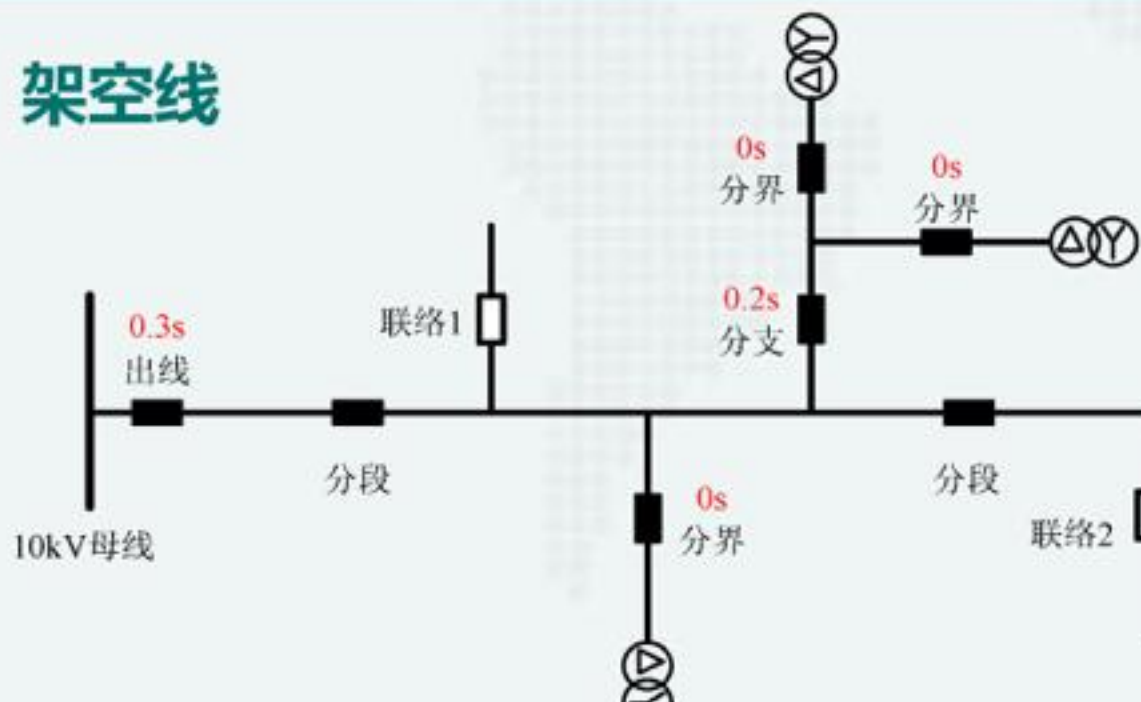
国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 10kV线路分级保护配置

变电站出线开关、线路分支开关、用户分界开关三级配合模式

	电流速断保护	过电流保护	零序电流I段	零序电流II段
变电站出线开关	1.8-3.6kA / 0.2-0.5s	0.7-1.2kA / 0.7-1.0s	120A / 0.6s	60A / 0.9s
线路分支开关	1.2-2.0kA / 0.1-0.2s	0.6-1.0kA / 0.3-0.6s	60A / 0.4s	/
用户分界开关	6-7Ie / 0-0.1s	1.5-2Ie / 0.2-0.4s	60A / 0-0.2s	/

架空线



电缆

3.2 分布式光伏接入对10kV线路保护的影响



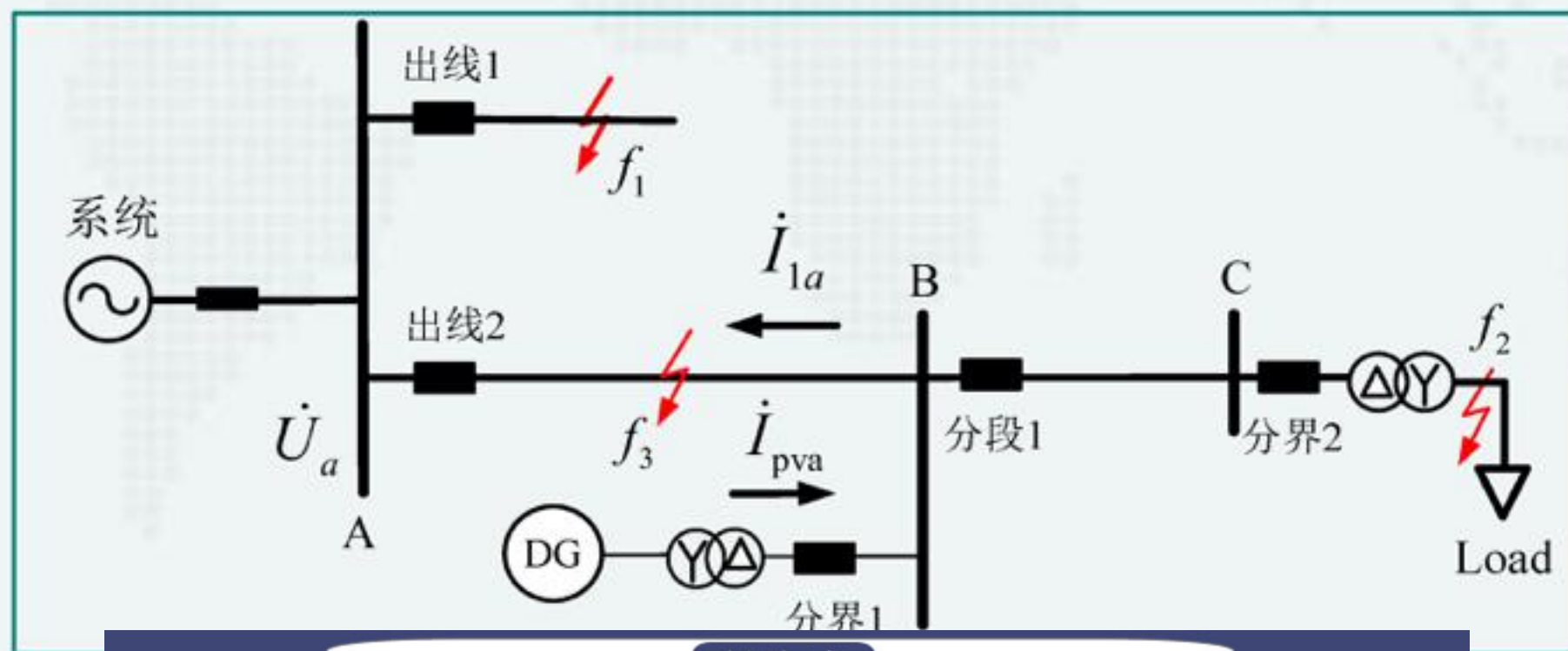
国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 短路故障电流分布

电网故障后，分布式光伏提供短路电流有限（按1.5倍额定电流计算），故障后最大脱网时间不超过2s，基于该故障特性进行保护影响分析。

- 1) 光伏反向故障电流的影响（针对相邻线路故障，如 f_1 ）
- 2) 光伏助增及外汲作用的影响（针对本线路光伏下游故障，如 f_2 ）





3.2 分布式光伏接入对10kV线路保护的影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 1) 光伏反向故障电流影响

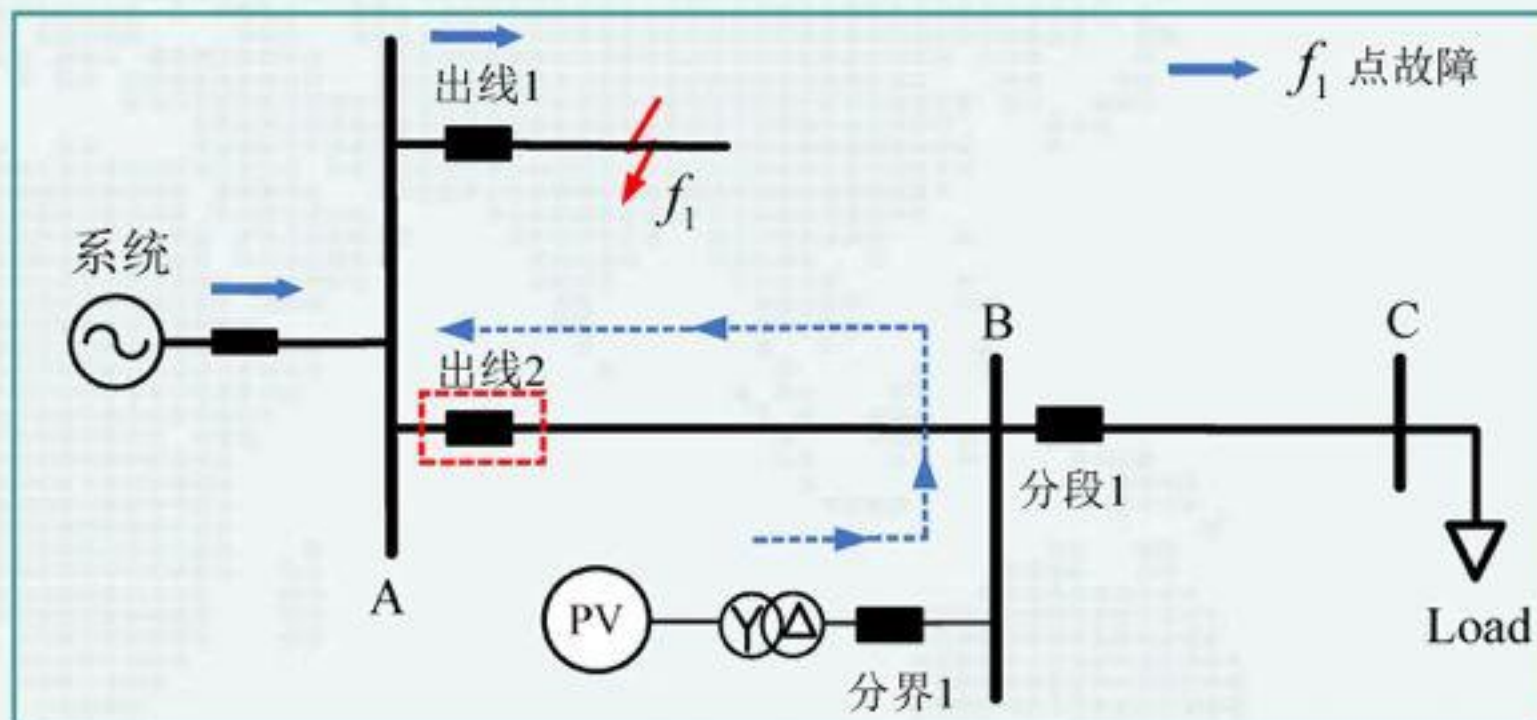
相邻线路 f_1 点短路，本线路接入的分布式光伏脱网前经**出线开关2**向故障点提供短路电流，需考虑出线2接入分布式电源容量。对**出线开关2**电流保护的影响如下：

(1) 电流速断保护的影响

光伏电源提供的**反向故障电流**，达不到**出线开关2**电流速断定值，对上游线路电流速断**无影响**。

(2) 过负荷保护的影响：

光伏接入容量超过**80%**线路额定容量时，提供的最大反向故障电流可能超过**出线开关2**过负荷保护定值（ $1.2 I_n$ ），出线1电流速断保护拒动情况下，出线开关2**过负荷保护误动**。



应对措施：分布式光伏接入容量超线路额定容量80%时，校核出线开关过电流保护是否可能误动，可增加**方向判据**，防止反向误动。



3.2 分布式光伏接入对10kV线路保护的影响



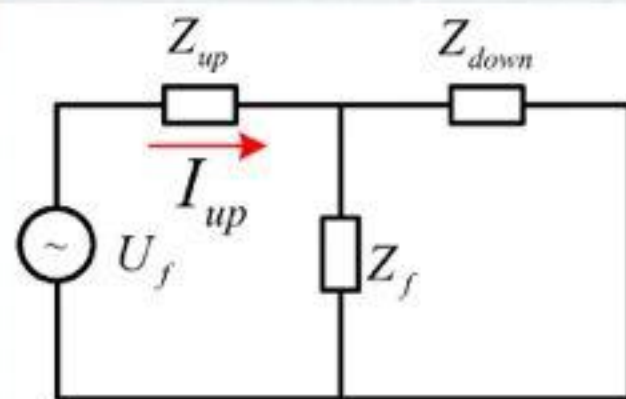
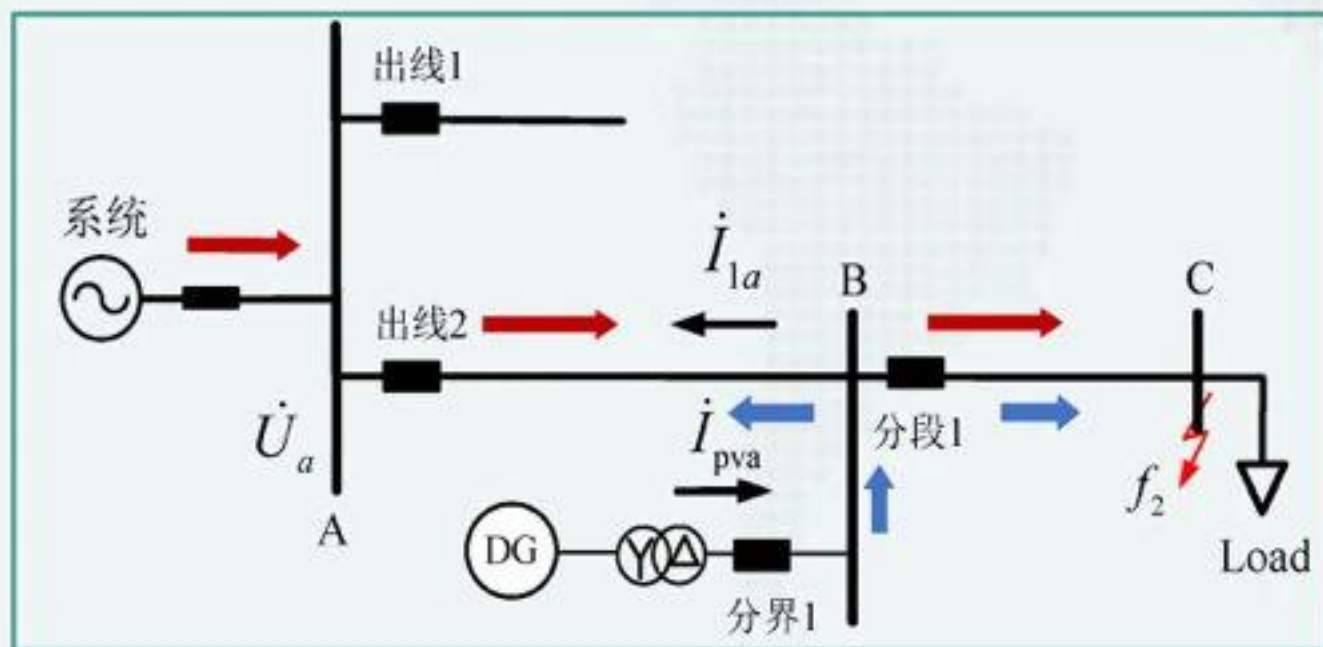
国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

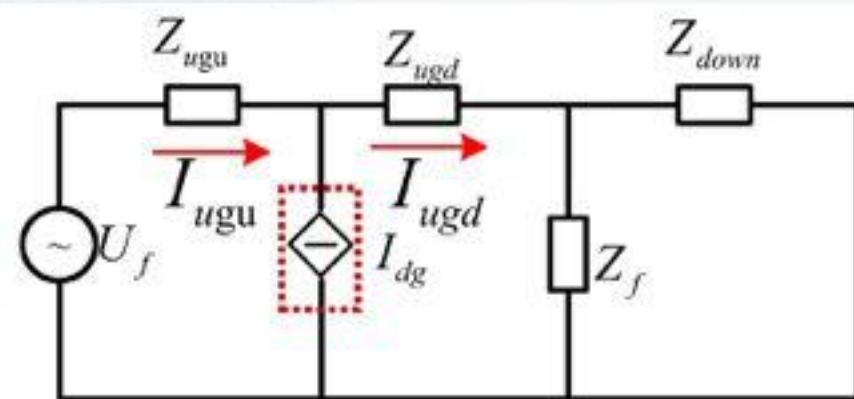
◆ 2) 助增及外汲作用

在 f_2 点发生故障时，受分布式光伏电源影响：

- **助增作用**：下游分段1短路电流增大，**最大助增**为光伏接入点距离故障点较近且距10kV电源较远情形；
- **外汲作用**：上游出线2短路电流减小，**最大外汲**为光伏接入点距离故障点较远且距10kV电源较近情形。



(a) 无分布式电源接入等值电路



(b) 含分布式电源接入等值电路

$$I_{up} = \frac{U_f}{Z_{up} + Z_f}$$
$$Z_{up} = Z_{ugu} + Z_{ugd}$$



$$\begin{cases} I_{ugd} = \frac{U_f}{Z_{up} + Z_f} + \frac{I_{dg}(Z_{ugu})}{Z_{up} + Z_f} \\ I_{ugu} = \frac{U_f}{Z_{up} + Z_f} - \frac{I_{dg}(Z_{ugd} + Z_f)}{Z_{up} + Z_f} \end{cases}$$

助增
外汲

3.2 分布式光伏接入对10kV线路保护的影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

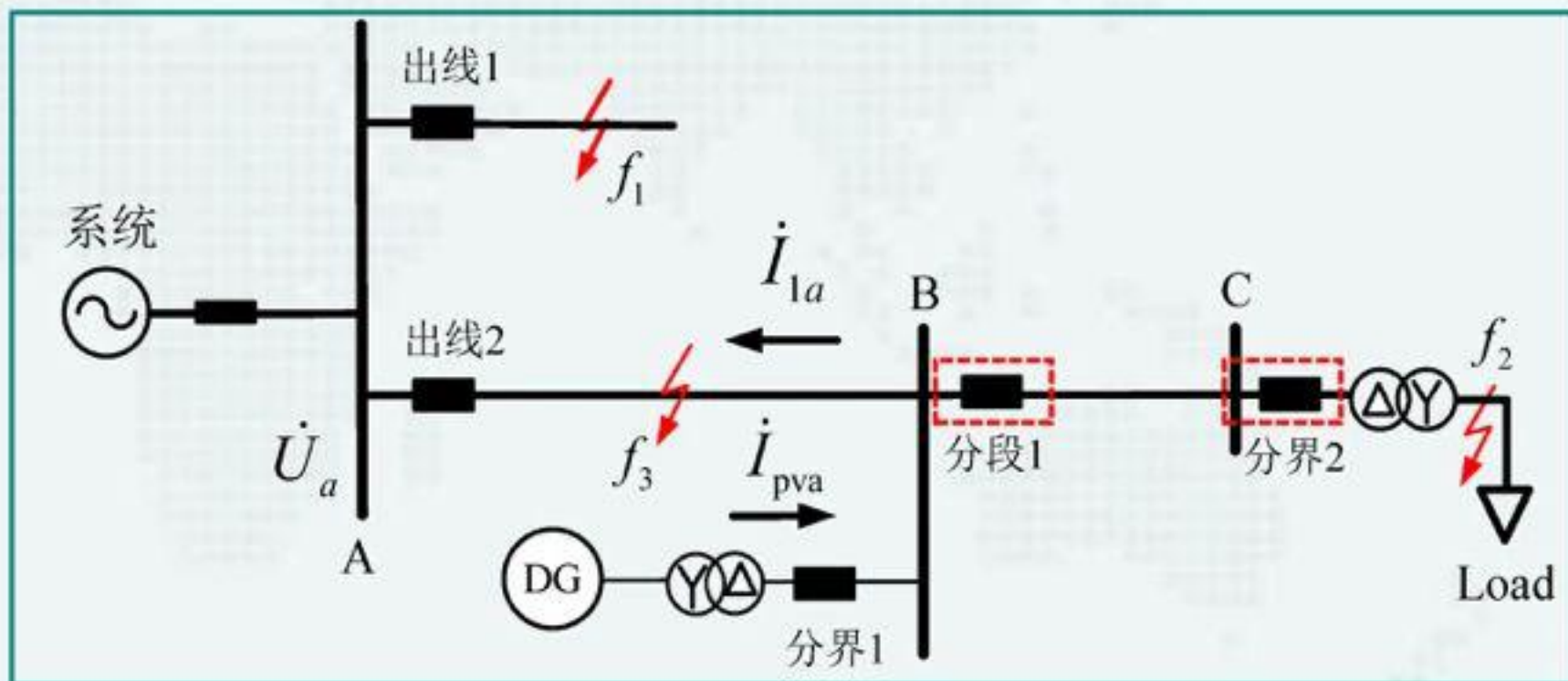
◆ 2) 助增及外汲作用

• 光伏接入点下游线路-分段开关1或分界开关2

f_2 故障时，光伏故障电流**助增作用**导致分段开关1和分界开关2故障电流增大，分段开关1和分界开关2的保护范围延长（**分级保护**）。

(1) **电流速断保护**通过**时间级差配合**保证上下游开关选择性跳闸，**光伏接入没有影响**。

(2) **过负荷保护**的影响与该开关电流速断保护的影响一致，**光伏接入无影响**。



结论： f_2 故障时，光伏故障电流**助增作用**对接入点下游线路过流保护无影响。



3.2 分布式光伏接入对10kV线路保护的影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

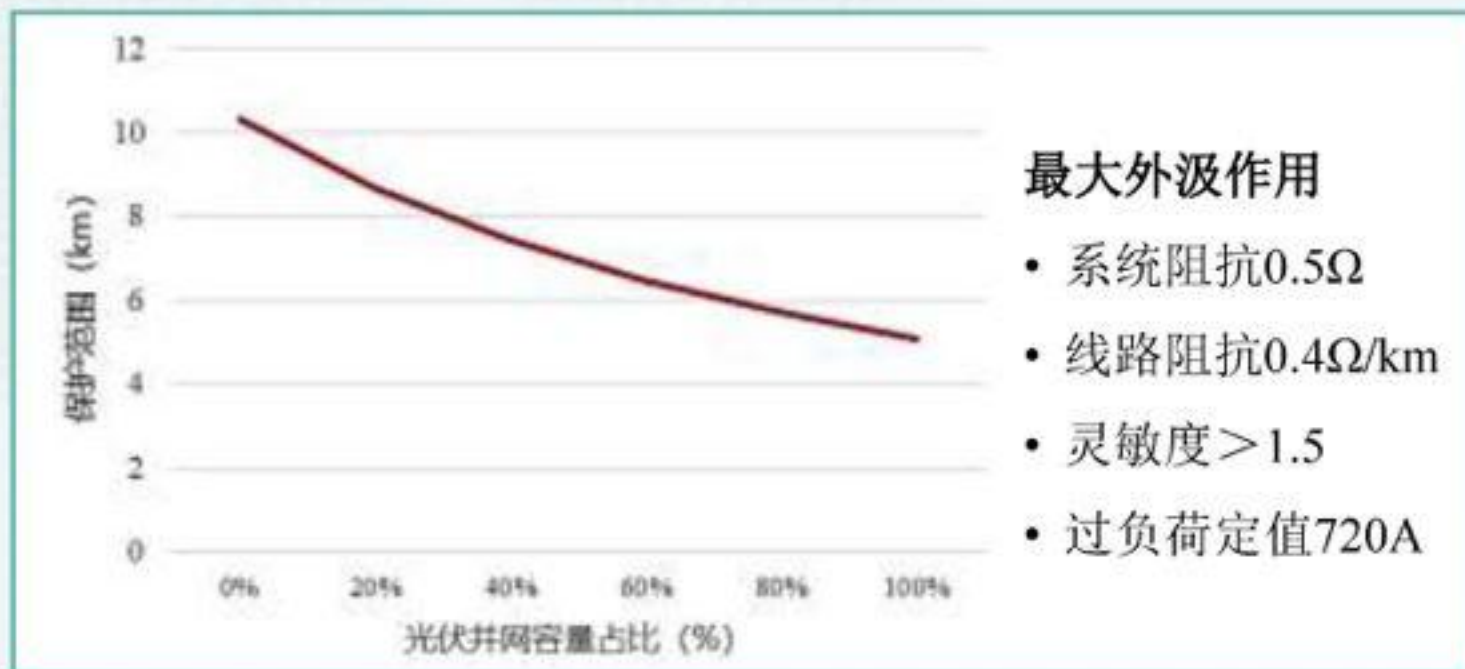
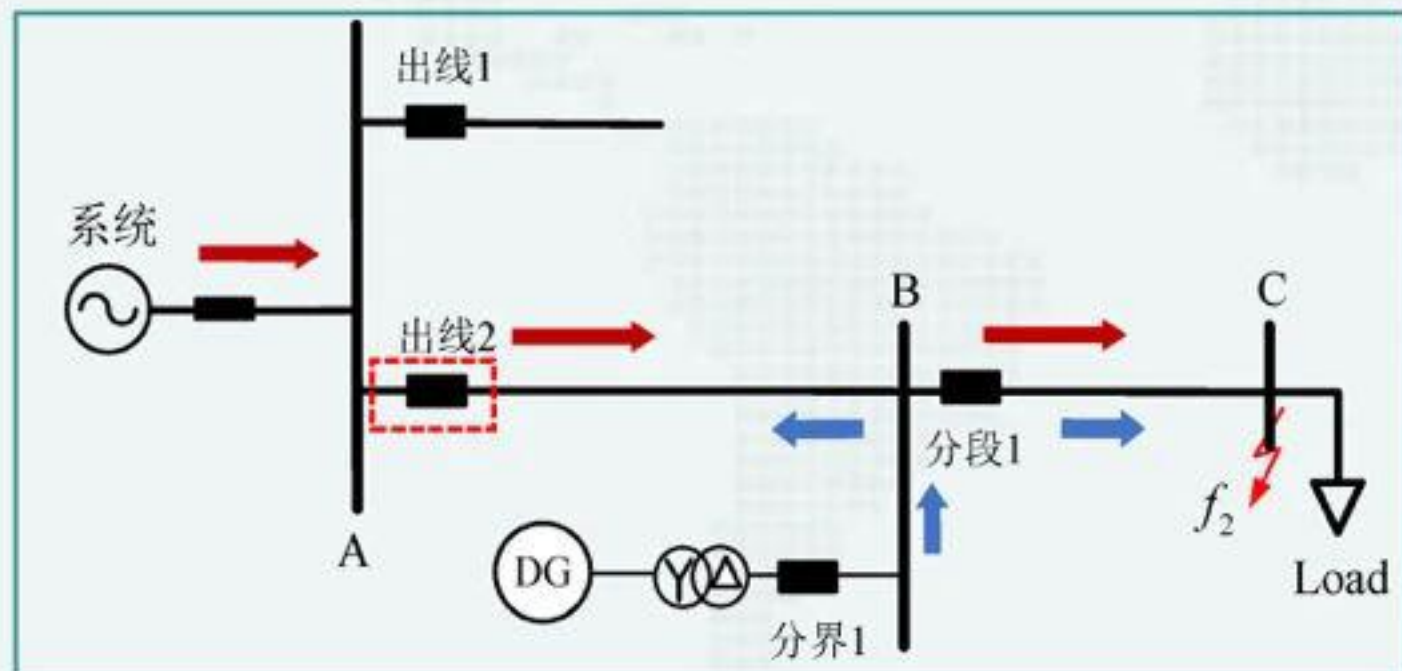
◆ 2) 助增及外汲作用

• 光伏接入点上游线路-出线开关2

f_2 故障时，光伏故障电流**外汲作用**导致上游出线开关2故障电流减小，出线开关2保护范围减小。

(1) **电流速断保护**：短路电流水平高，短线路影响较小；

(2) **过负荷保护**：灵敏度降低，保护范围缩小；接入容量越大外汲效应越明显，保护范围越小。



□ **应对措施**：长线路应**校核过流保护灵敏度**，灵敏度不足时，可通过配电线路**分级保护**解决，通过时间级差配合保证下游开关选择性跳闸，且上游保护故障电流减小，可靠不动作。



3.4 分布式光伏接入对线路重合闸的影响

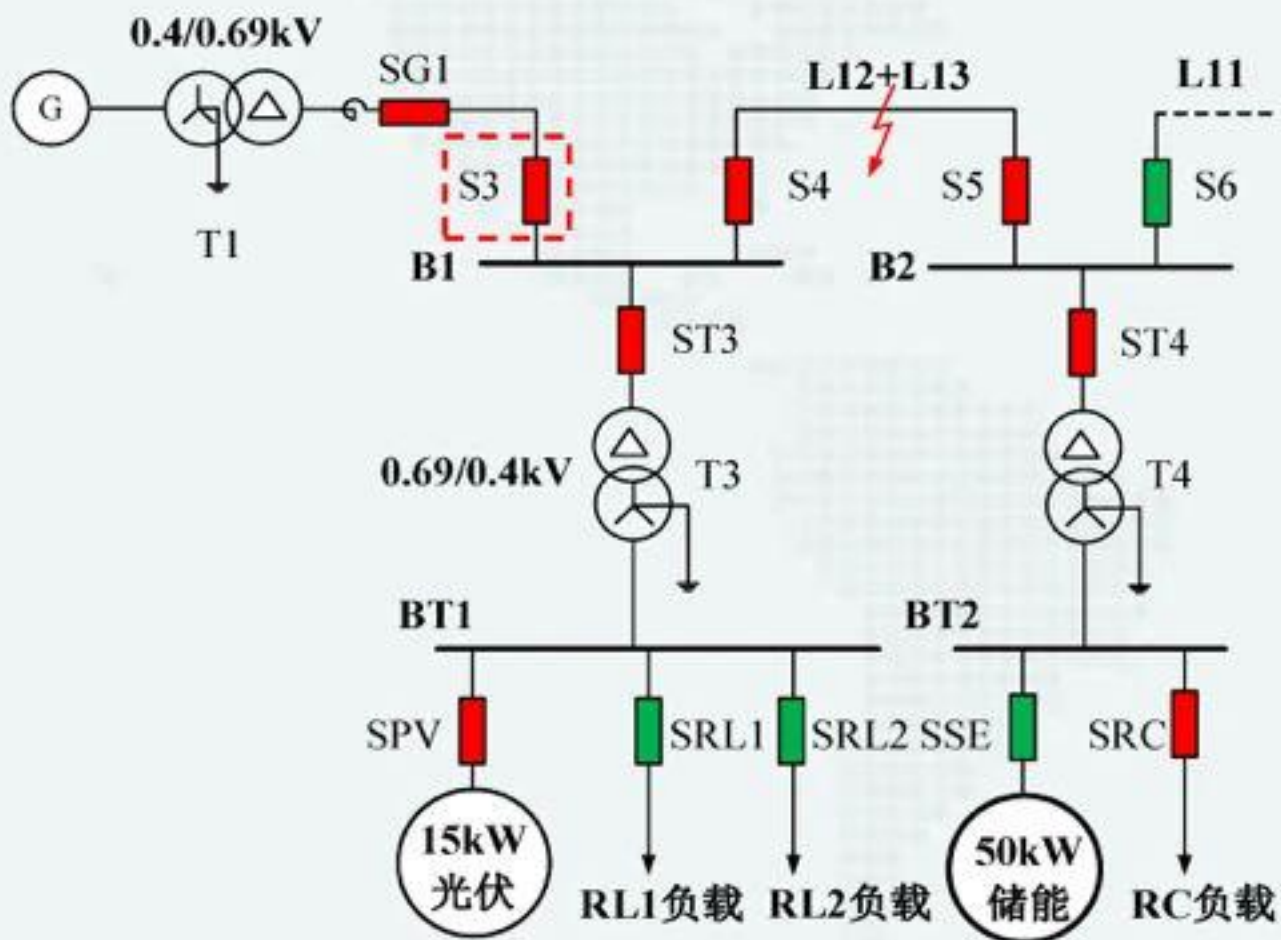


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ (2) 重合闸影响动模试验：考虑光伏逆变器实际特性下的重合闸影响；

RC负载处于合闸状态，0s时刻线路L12末端发生三相故障，过渡电阻为3.5欧姆。



重合闸试验运行方式图

S3跳闸及重合闸过程模拟试验结果

序号	光伏出力/kW	负载/kW	S3跳闸延时/s	故障持续/s	脱网频率/Hz	脱网时间/ms	重合闸时间/s	合闸冲击
1	10.17	15	0.2 / 0.27	0.3	/	18	1.05	无
2	10.17	10	0.2 / 0.28	0.3	/	19		无
3	10.17	7.04	0.2 / 0.27	0.3	/	16		无
4	10.17	7.04	0.2 / 0.27	0.55	75	249		无
5	10.17	7.04	0.1 / 0.15	0.55	75	253		无

试验结果：重合闸前，光伏电源因孤岛保护动作快速脱网，重合闸无冲击，重合成功后，光伏进入重新并网过程。



3.4 分布式光伏接入对线路重合闸的影响

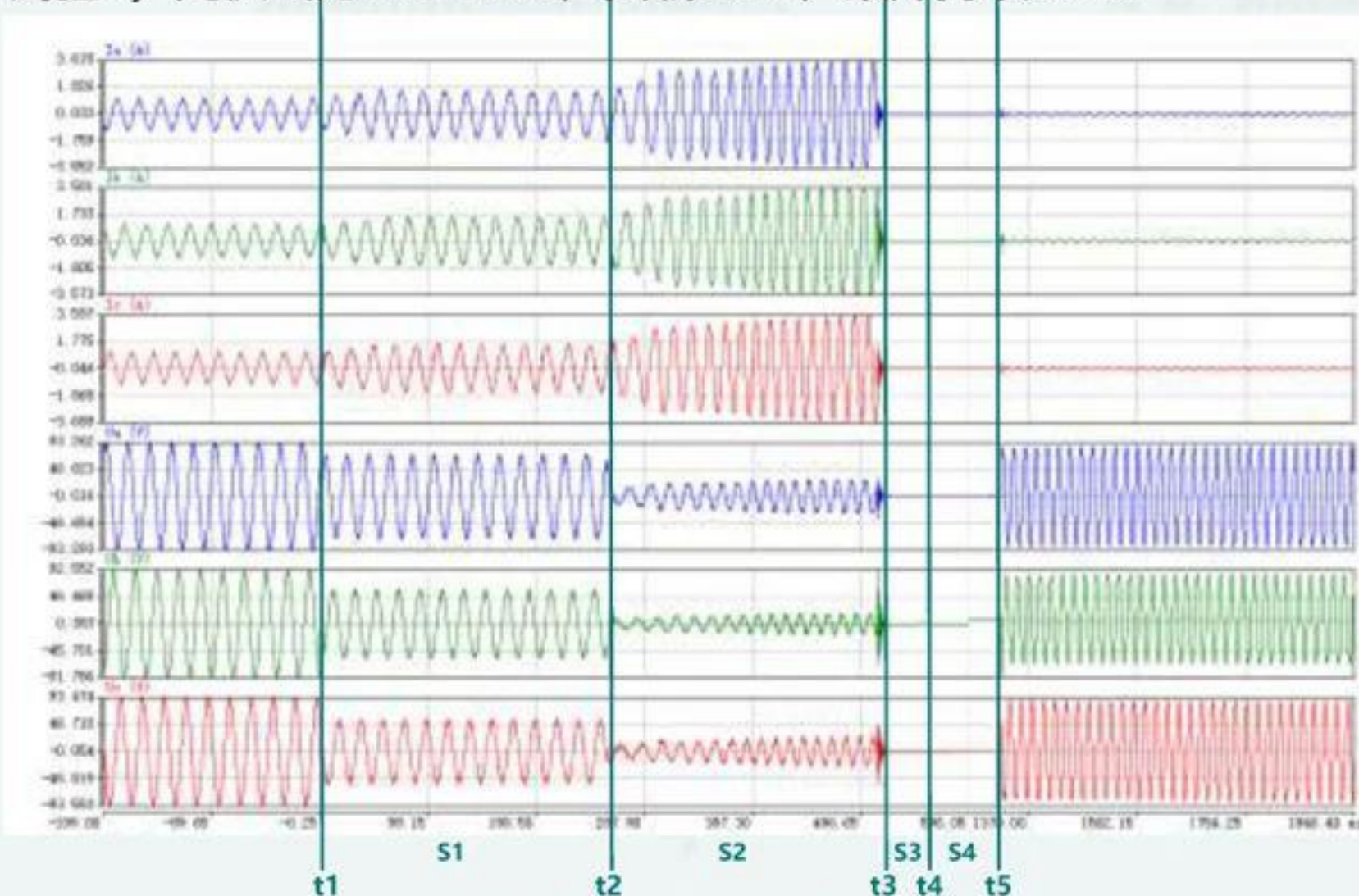


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ (2) 重合闸影响动模试验

试验4) 光伏出力10.17kW, 负载7kW, 故障持续0.55s



重合闸试验-光伏SPV电压和电流

- t1时刻: L12末端发生三相故障;
- t2时刻: 经266ms, 开关S3跳闸;
- t3时刻: 经249ms**光伏脱网**, 频率增大至75Hz;
- t4时刻: **故障消失**;
- t5时刻: 经766ms, 开关S3重合闸, 无明显冲击。

改进措施:

- 加强光伏电源**防孤岛保护**验收;
- 调整重合闸时间 ($>2s$), **与分布式光伏防孤岛保护配合**, 确保在光伏脱网后重合。
- 必要情况下, 配电线路采用**检无压三相一次重合闸**, 加装线路PT。



3.4 分布式光伏接入对线路重合闸的影响



国家电网
STATE GRID

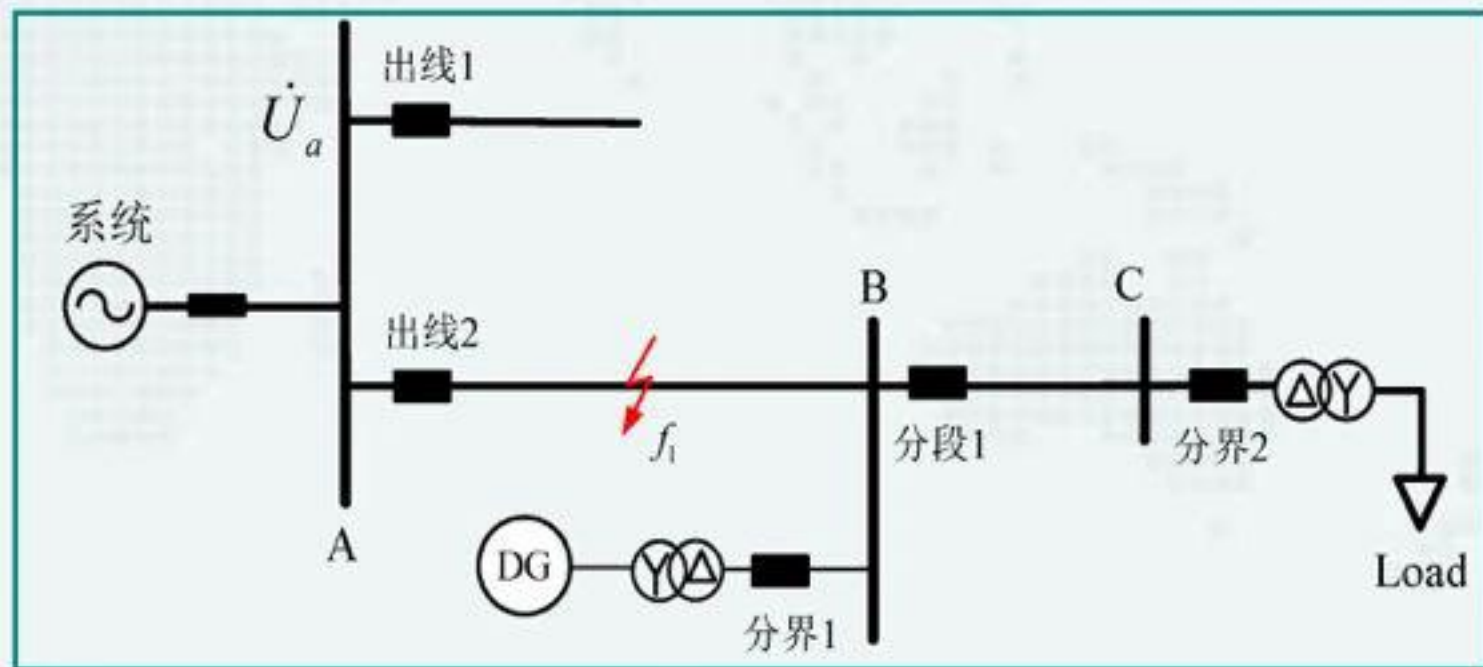
国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 10kV配电线路重合闸通常采用**无检定三相一次重合闸**。

- 线路保护重合闸时间一般取1.1s~1.4s，电网故障后，分布式光伏脱网前持续向故障点提供短路电流（最长脱网动作时间2s），**影响瞬时性故障重合闸成功率**。
- 若故障后分布式光伏与负载形成长期孤岛，由于光伏的电压支撑，线路重合闸存在**非同期合闸**风险，可能会给系统内电气设备产生影响。

(1) 重合闸影响仿真计算

- 线路AB发生BC相间接地故障；
- 出线开关跳闸，**模拟光伏带电阻负载孤岛运行**，光伏出力8.3MW，负载功率4~12MW；
- 光伏电源与系统**相位差180°重合闸**，仿真案例冲击电压、电流在允许范围内。



重合闸仿真示意图



3.5 110kV主变间隙保护影响



国家电网
STATE GRID

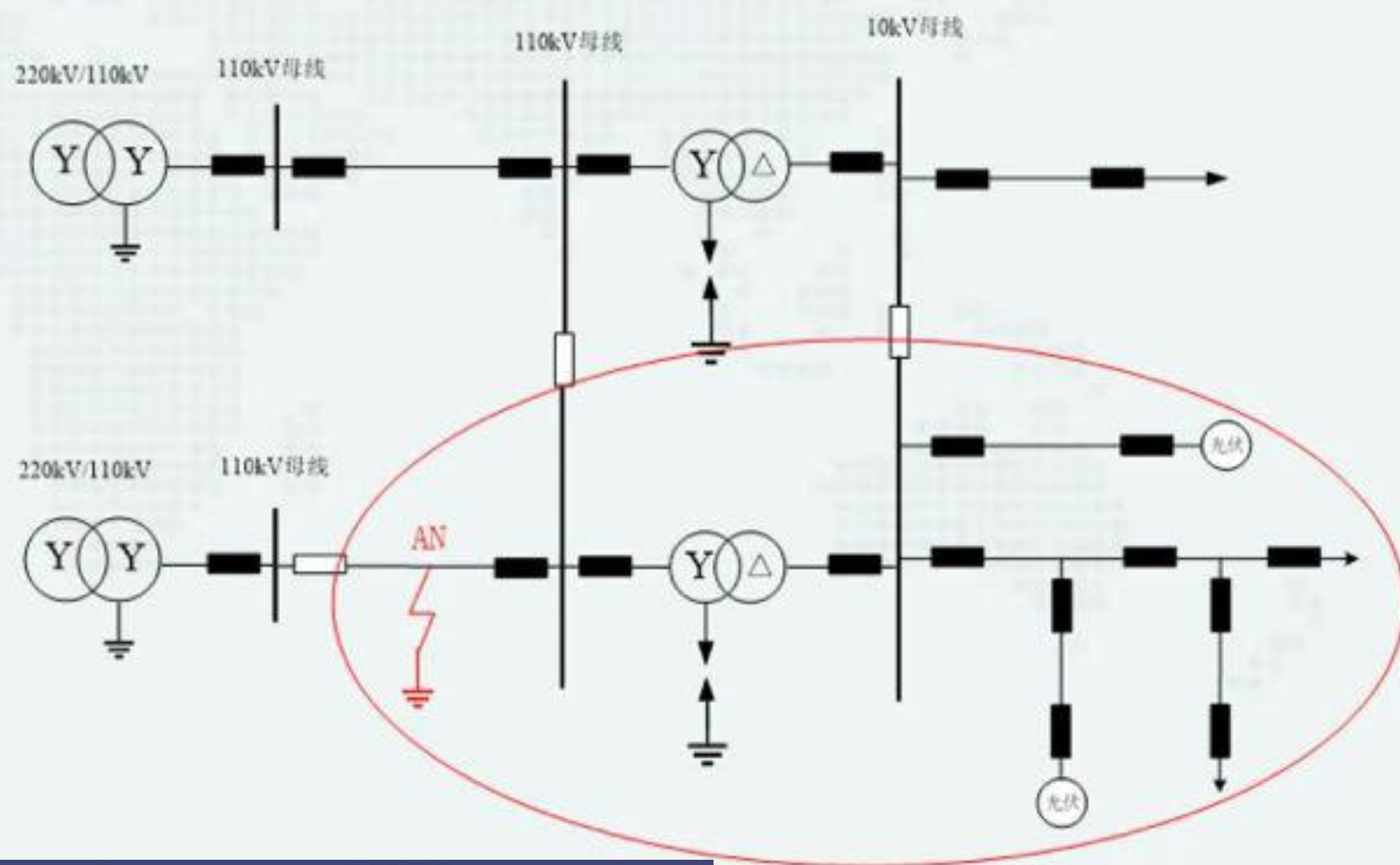
国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 影响分析

110kV线路保护一般按单电源原则配置，故障后仅电源侧开关跳开，故障未完全隔离，大量光伏接入后使负荷侧电网可能形成孤岛带故障运行。

可能导致以下问题：

- 故障点熄弧时间延长；
- 负荷侧由中性点直接接地系统变为中性点不接地系统，可能导致110kV主变**间隙保护动作，扩大动作范围，并闭锁备自投**，甚至导致负荷损失。





3.5 110kV主变间隙保护影响

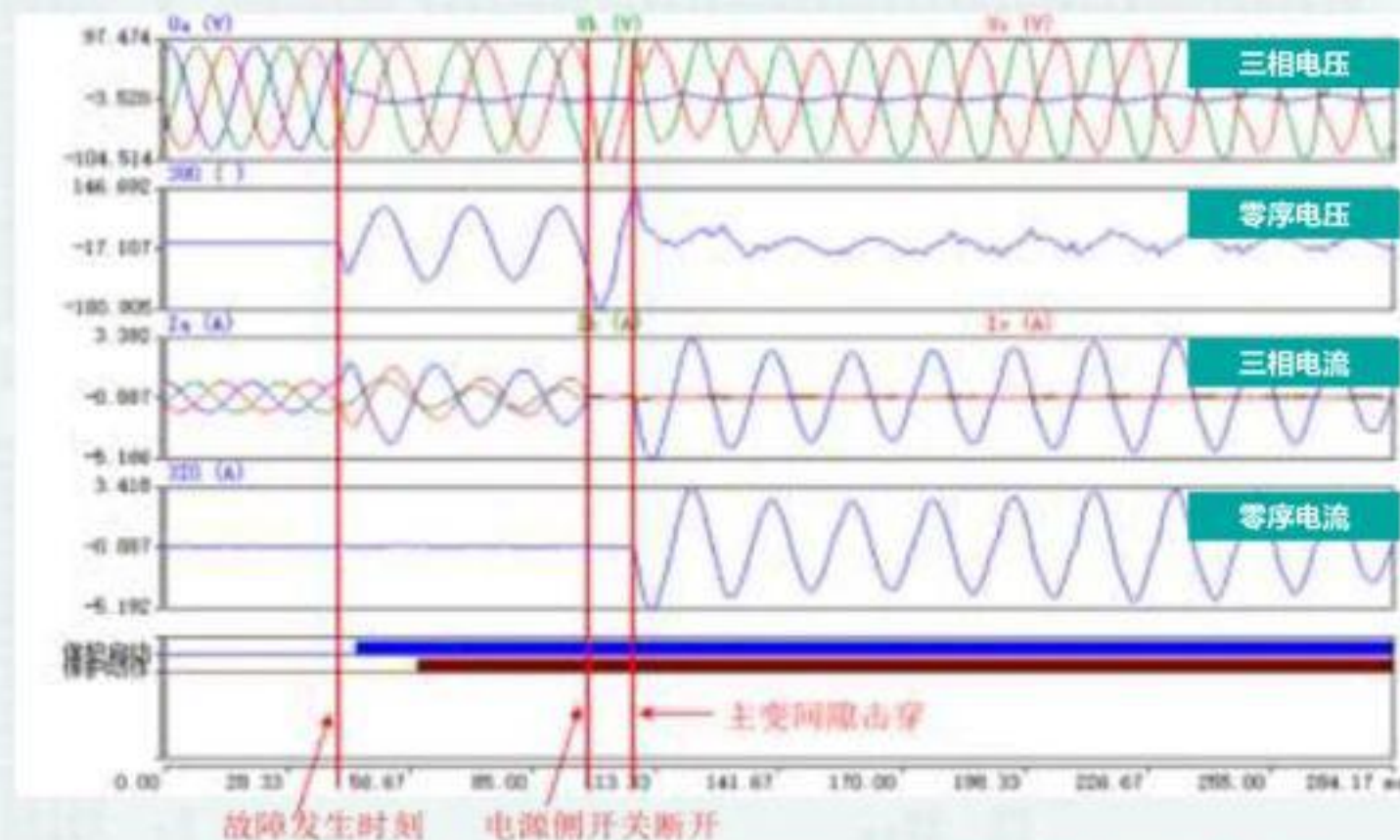
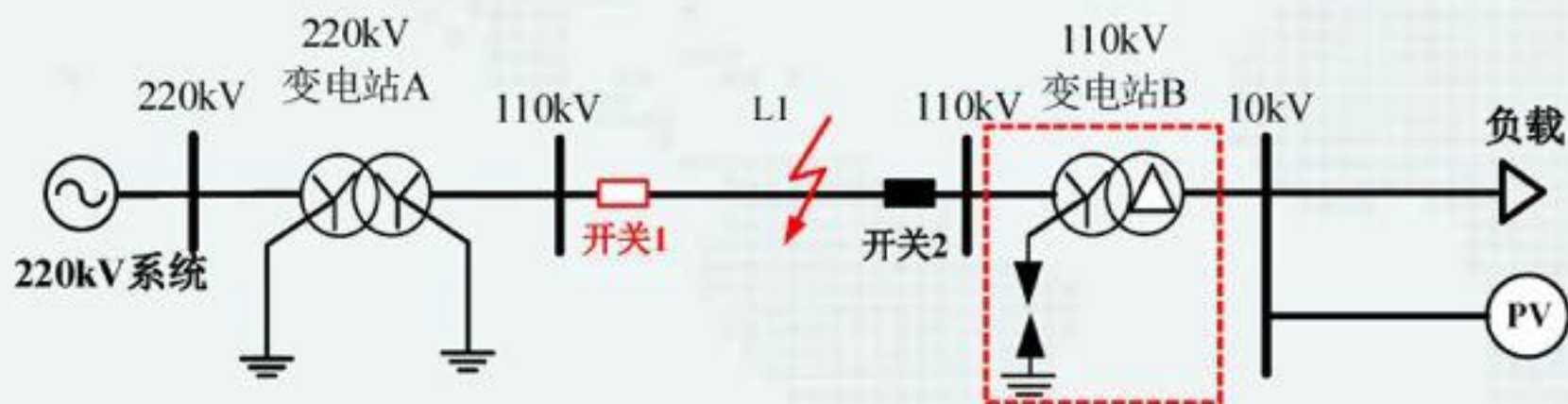


国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 现场案例

110kV线路发生A相接地故障后，系统侧开关1跳开，负荷侧**光伏电站**与负荷孤岛运行，110kV系统零序电压升高，主变间隙击穿，0.5s后间隙保护动作，切除主变。



▲ 110kV变电站B（开关2）线路保护故障录波

◆ 应对措施

- 110kV线路所供负荷侧光伏容量较大时，110kV线路保护投**双侧跳闸**，两侧启用重合闸。
- 完善主变间隙保护功能，设置**两段时限**，**1时限切光伏并网线路**，2时限跳主变开关。



3.6 分布式光伏接入对备自投的影响



国家电网
STATE GRID

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. RESEARCH INSTITUTE

◆ 高压分段备自投

110kV线路发生故障后，系统侧开关跳开

- 如下情况，备自投启动条件不满足，**低电压或防孤岛保护动作切除分布式光伏**后，备自投启动，动作时间延长。

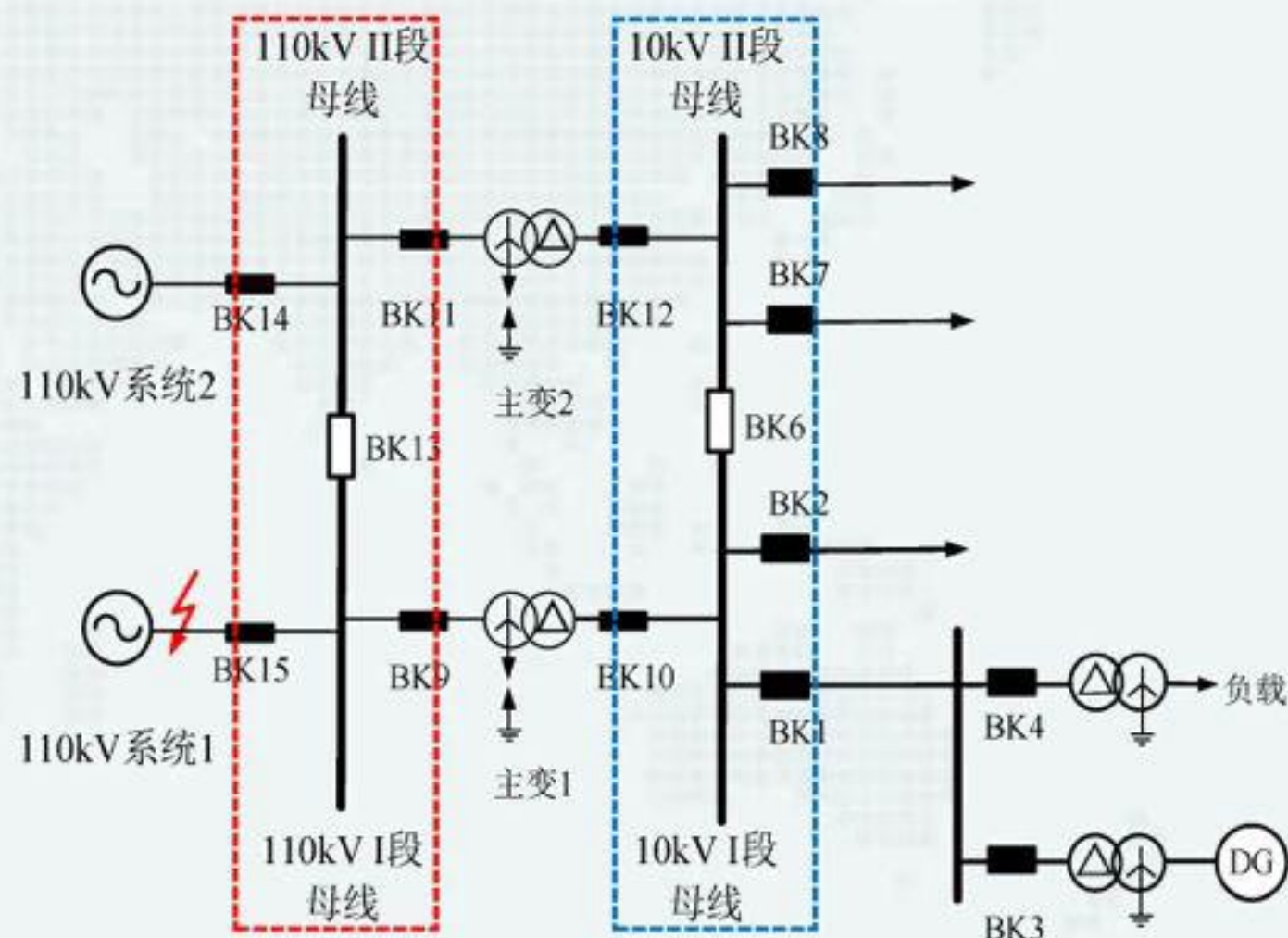
- 1) 分布式光伏向故障点持续反送电。
- 2) 分布式光伏与负荷形成孤岛，无压条件不满足。

- 主变**间隙保护动作**，高压分段备自投闭锁。

◆ 低压分段备自投

10kV主变1故障时，主变1高、低压侧开关跳闸：

- 分布式光伏与负荷形成孤岛，10kV I母线可能**不满足无压条件**，**防孤岛保护动作切除分布式光伏**，待备自投检无压满足后，备自投启动，动作时间延长。



▲ 备自投运行方式图

04

工作展望



◆ 近期工作

- 加强高比例分布式光伏接入地区配电网故障案例及数据收集和分析；
- 重点关注各类型入网光伏逆变器故障电流特性及限值、孤岛运行等性能；
- 结合实际场景，定量研究保护适应边界，为分布式光伏接入容量、布局等提供就建议。
- 积极开展5G配网保护等新原理、新技术、新方案试点，做好运行数据分析评估。

◆ 后续研究

- 构网型分布式电源故障特征及其对保护控制影响；
- 分布式光伏消纳带来的配网结构变化（如柔性合环等）对保护控制的影响及应对措施。
- 分布式光伏占比升高、储能大量应用等，配电网形态及并网要求改变对保护控制的影响。



汇报结束， 敬请批评指正

谢 谢



2023年5月

