

新型电力系统 继电保护技术探索与展望

——◆ 报告人：郑玉平 ◆——

2021年12月15日

一 新型电力系统形态

二 继电保护技术挑战

三 继电保护新技术探索

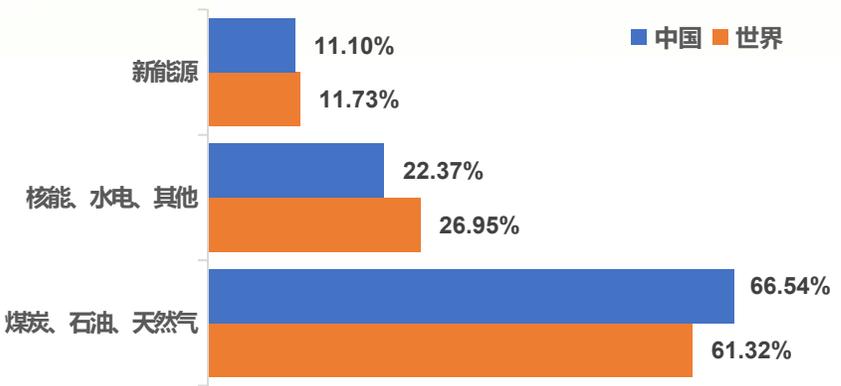
四 总结与展望

一、新型电力系统形态

构建新型电力系统是我国实现“双碳”目标的必然选择。

新型电力系统将以新能源为供应主体，实现电力脱碳。

2020年我国各种燃料发电量占比



*来源：2021版《bp世界能源统计年鉴》

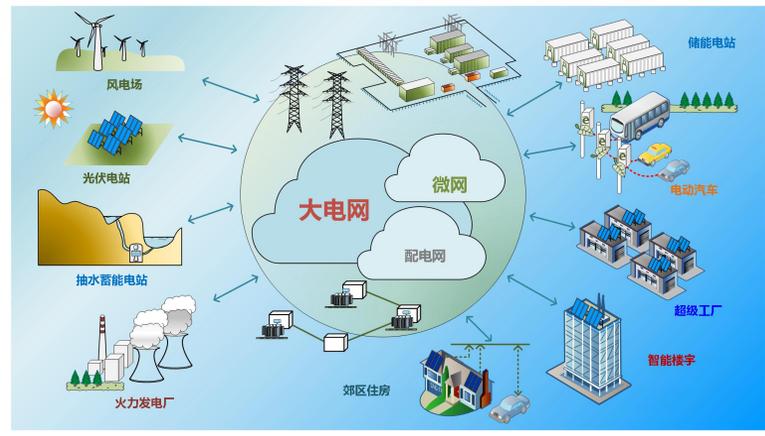
我国高达**66.54%**的电力来自煤炭、石油、天然气，电力脱碳是实现碳中和目标的关键。

新型电力系统将支撑电能广泛替代，服务全社会降碳脱碳。



我国电力占终端能源消费比重目前为**26%**，要实现碳达峰碳中和目标，到2060年我国电能消费比重预计达到**70%以上**，终端能源消费电气化进程加快。

新型电力系统将发挥电网互联优势，实现各类发电资源的共享和互济。



构建“**风光水火储一体化**”，发挥大电网互联优势，实现各类发电资源在**就地微网、区域电网以及互联大电网**的共享和互济。

一、新型电力系统形态

新型电力系统形态：交流电技术为基础，大电网与微电网、直流组网等多种组网技术融合发展，高比例新能源、高比例电力电子设备接入是电网基本特征。

交流电技术仍然是基础

投产时期	装机容量 (万千瓦)	占比
2000年前	9500	8.8%
2000-2010	55625	51.5%
2010-2015	23618	21.9%
2015-2020	19257	17.8%

目前我国不同寿命期煤电机组构成*

2060年，预计同步电源装机25.5亿千瓦（其中光热2.5亿），占比36%；考虑新能源出力的随机波动性，同步电源开机容量占比18%~77%、发电出力占比10%~67%*。

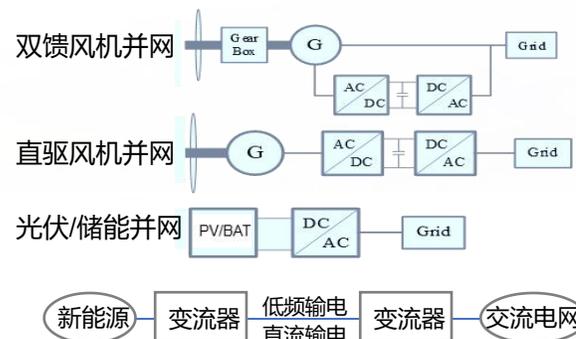
*来源：陈国平，《构建新型电力系统的若干思考》

新能源集中/分布接入电网



预计2060年全国新能源装机占比将超过60%，发电量将超过50%。新能源通过集中或分布接入电网，逐渐在电源结构中占主体地位。

电力电子设备发挥重要作用



支撑新能源并网和输送



作为灵活控制手段

一、新型电力系统形态

- 新型电力系统设备脆弱性、故障连锁性，对继电保护提出更高要求。
- 新型电力系统故障特征将发生深刻变化，现有继电保护体系面临严峻挑战。

大电网单一故障
全局化特征

大型设备安全
问题依然严峻

故障离散
非线性特征

变流器本体保护
及控制策略

对保护性能要求更高

故障形态发生深刻变化

挑战1.

新型电力系统故障规律
分析和共性特征提取困难

挑战2.

传统继电保护技术难以
适应新故障形态

挑战3.

分布式电源影响配电网
故障快速隔离和自愈

保障设备和系统安全运行，继电保护责任重大，任重道远。

一 新型电力系统形态

二 继电保护技术挑战

三 继电保护新技术探索

四 总结与展望

二、继电保护技术挑战

挑战1：新型电力系统故障规律分析和共性特征提取困难

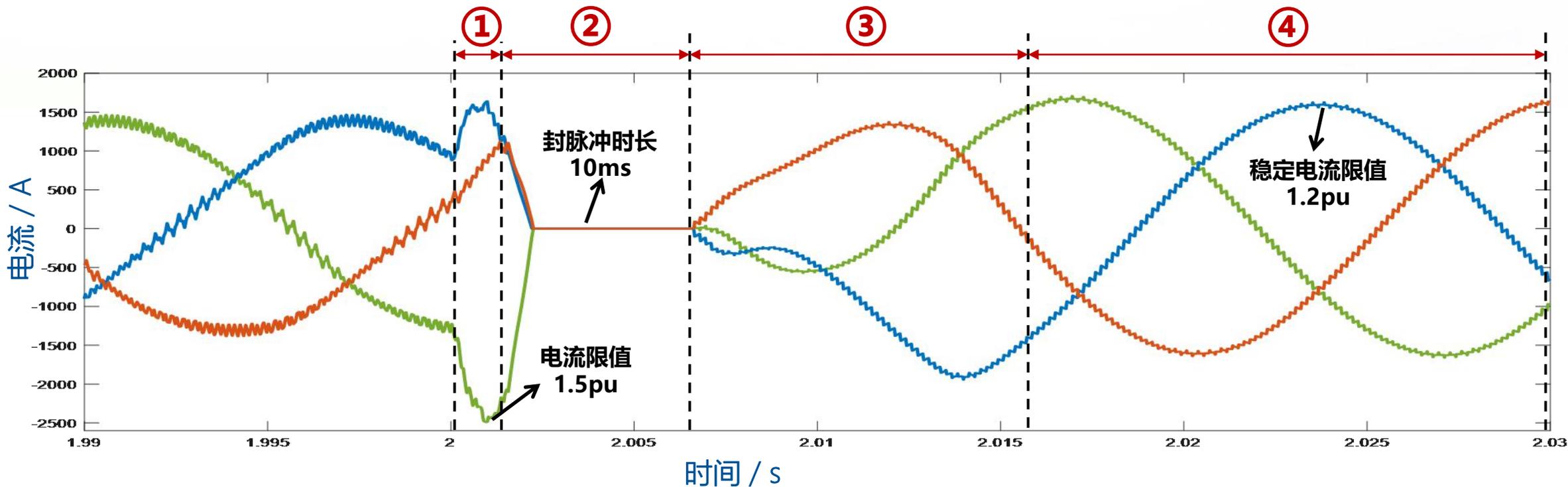
□ 光伏故障暂态特性分析

阶段1：暂态自然响应，不受电力电子控制策略影响

阶段2：本体保护响应，功率管控制脉冲封锁保护及重新恢复

阶段3：控制器动态响应，对故障期间电流指令值的动态响应及跟踪速度

阶段4：控制器稳态控制，不同故障电流控制目标（负序电流抑制、有功/无功出力比例等）的精准控制

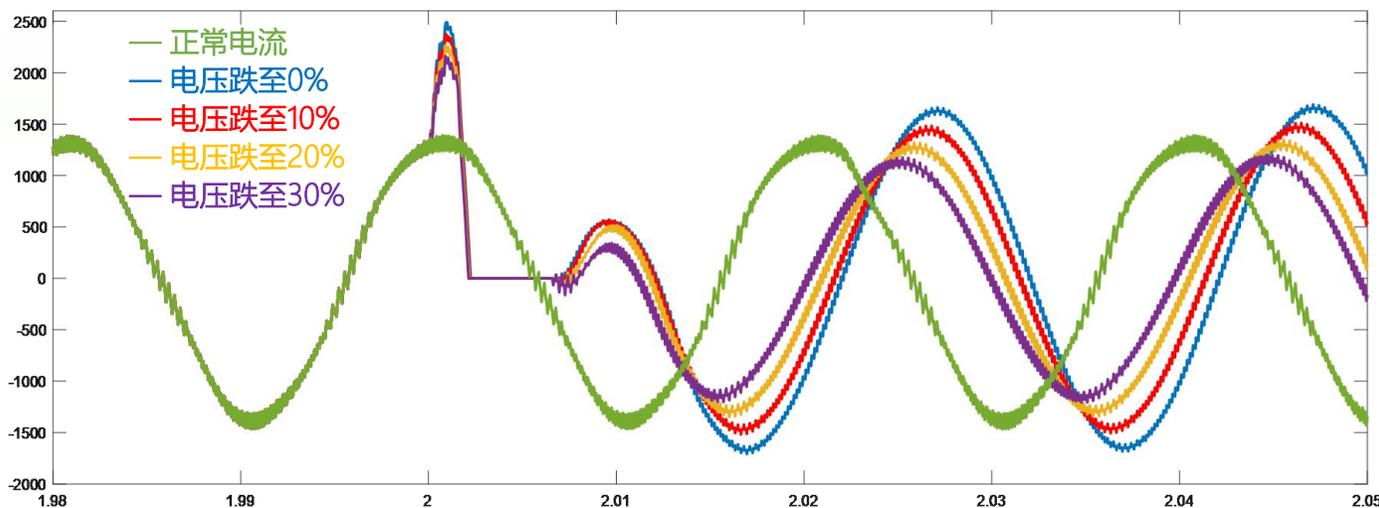


二、继电保护技术挑战

挑战1：新型电力系统故障规律分析和共性特征提取困难

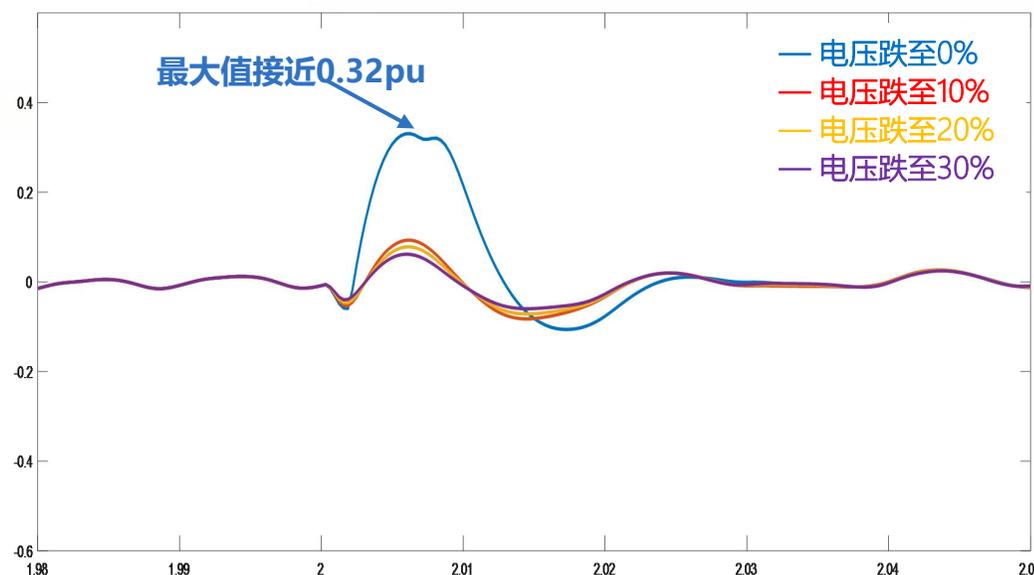
□ 光伏故障暂态特性分析

- 随着电压跌落深度变小，支撑电压的无功电流减小，并在系统容量许可的范围内输出一定的有功电流，故障期间的电流相位对比无故障时的**电流相位差值**随之减少。
- 当发生不对称故障时，暂态过程中的负序电流尖峰随着跌落深度增加明显增大，随着逆变器**负序电流抑制策略**的介入，负序电流经过控制器闭环动态调节后，实现有效抑制。



电压跌至	0%	10%	20%	30%
相位变化	-108°	-90°	-72°	-54°
幅值比	1.2	1.05	0.96	0.9

电压跌落深度对故障电流幅值及相位的影响



不对称跌落深度对故障电流负序分量影响(投入负序抑制)

二、继电保护技术挑战

挑战1：电网故障形态发生深刻变化，故障暂稳态发展过程亟待厘清

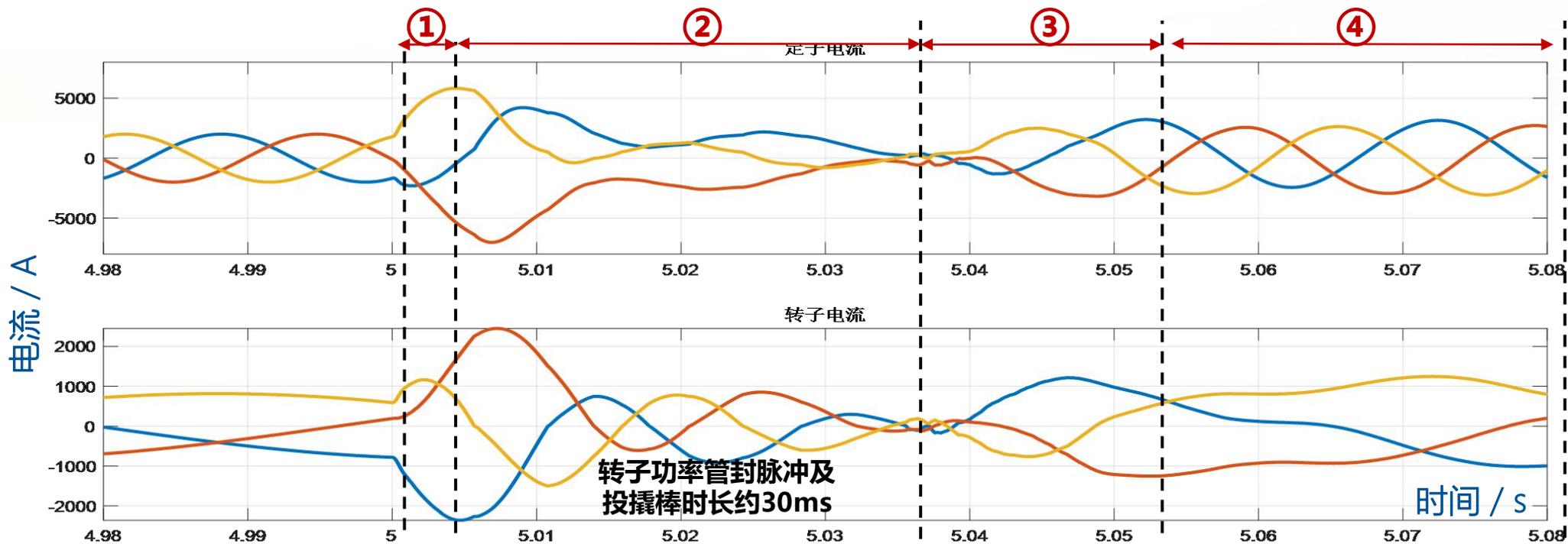
□ 双馈风机故障暂态特性分析

阶段1：暂态自然响应，不受电力电子控制策略影响

阶段2：控制器暂态响应，转子功率管脉冲闭锁，撬棒电路投入，定子电流感应出转速频率分量

阶段3：控制器动态响应，对故障期间电流指令值的动态响应及跟踪

阶段4：控制器稳态控制，按照故障穿越控制目标（有功/无功出力比例）对输出电流精准控制

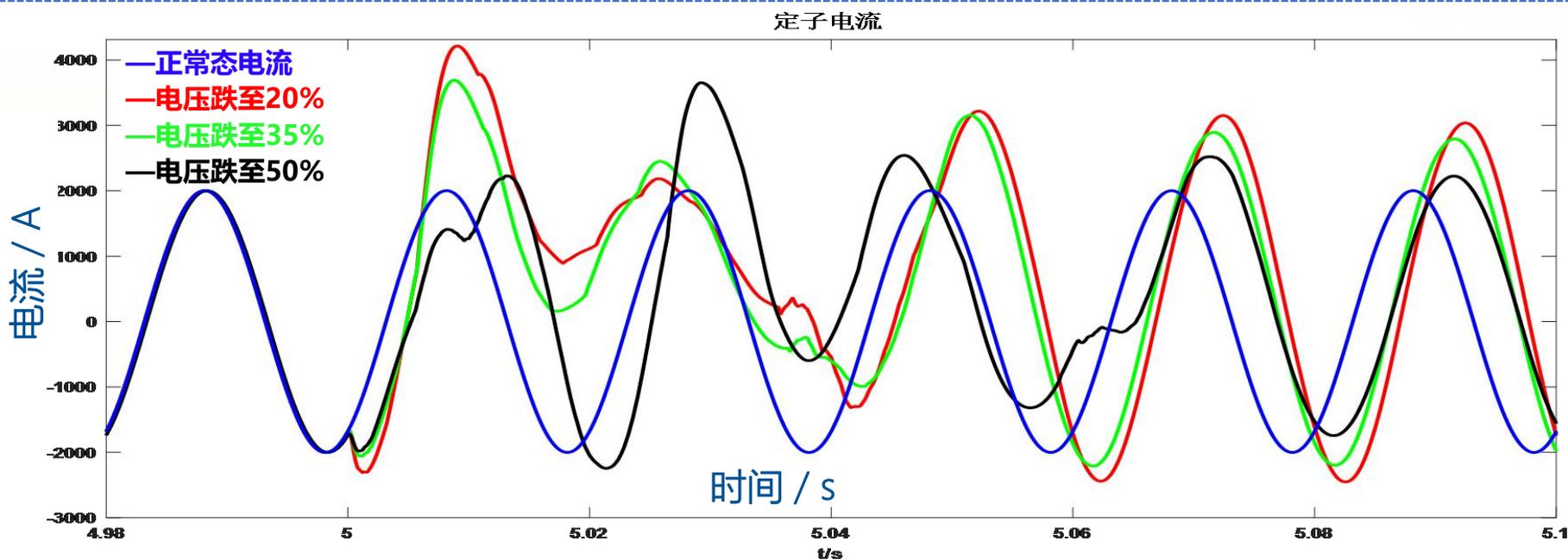


二、继电保护技术挑战

挑战1：新型电力系统故障规律分析和共性特征提取困难

□ 双馈风机故障暂态特性分析

- 随着电压跌落深度变小，支撑电压的无功电流减小，并在系统容量许可的范围内输出一定的有功电流，故障期间的交流电流相位对比无故障时的电流相位差值随之减少。
- 当网压跌落程度较深时，转子变流器过流封锁，定子电流在暂态响应阶段出现转速频率分量，谐波含量较大；当跌落程度较浅时，定子电流动态过程由变换器及网压共同决定。



电压跌至	20%	35%	50%
相位变化	-72°	-60°	-54°
幅值比	1.4	1.29	1.01

电压对称跌落深度对故障电流幅值及相位的影响

二、继电保护技术挑战

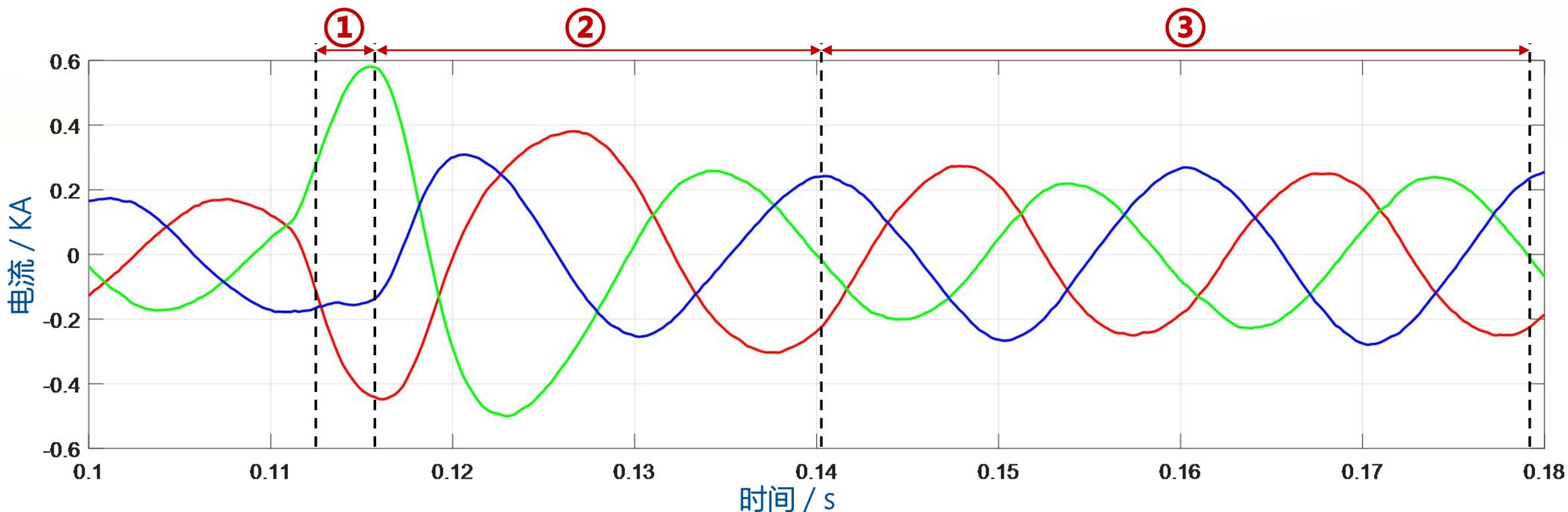
挑战1：新型电力系统故障规律分析和共性特征提取困难

□ 柔直交流侧故障暂态特性分析

阶段1：暂态自然响应，不受电力电子控制策略影响

阶段2：控制器动态响应，对故障期间电流指令值的动态响应及跟踪

阶段3：控制器稳态控制，故障电流控制目标对负序电流抑制以及有功出力的精准控制

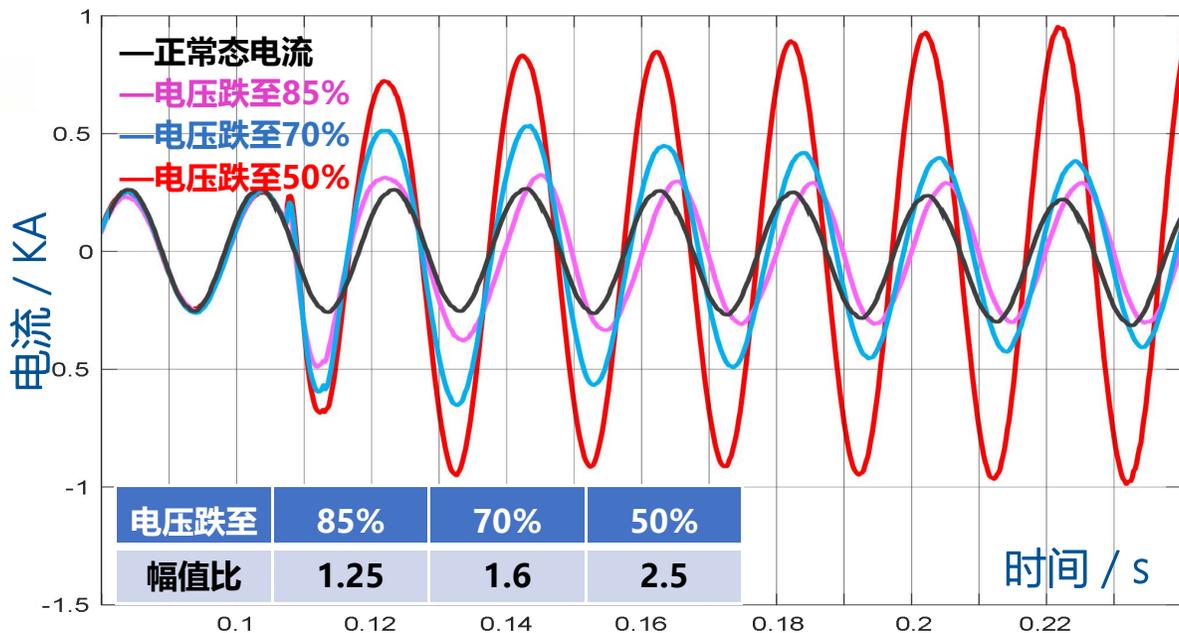


二、继电保护技术挑战

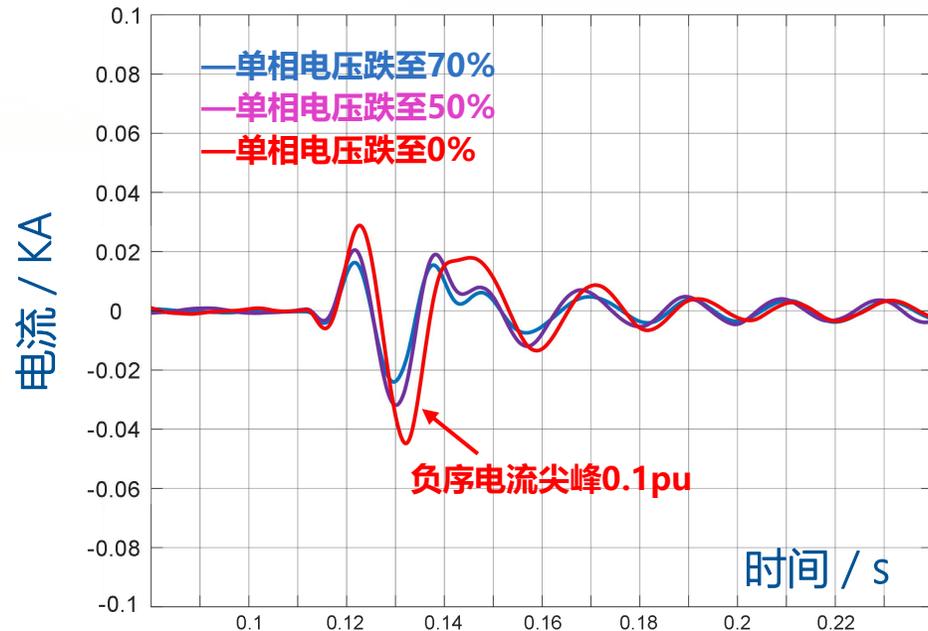
挑战1：新型电力系统故障规律分析和共性特征提取困难

□ 柔直交流测故障暂态特性分析

- 当发生对称跌落故障时，随着电压跌落深度变大，为了在系统容量许可的范围内保持有功功率传输，故障期间交流电流的幅值对比无故障时的**电流幅值变大，相位基本不变**。
- 当发生不对称故障时，暂态过程中的负序电流尖峰随着跌落深度增加明显增大，由于**负序电流抑制策略**的作用，负序电流经过控制器闭环动态调节后，实现有效抑制。



电压跌落深度对故障电流幅值的影响



不对称跌落深度对故障电流负序分量影响(投入负序抑制)

二、继电保护技术挑战

挑战1：新型电力系统故障规律分析和共性特征提取困难

- **四个阶段：**新能源电源和柔直在故障穿越的整个过程可以体现为暂态自然响应、本体保护响应、控制器动态响应和控制器稳态控制四个阶段。
- **电流幅值受限：**受电力电子器件自身安全性要求，故障电流幅值受限，体现为弱馈特征。
- **电流相位受控：**光伏、直驱风机、双馈风机在稳态控制阶段按照故障穿越要求，输出无功功率，电流相位相较于故障前体现滞后性，随电压跌落深度增大，相位偏差呈增大趋势。
- **波形畸变：**控制器的动态调节过程必然引起波形畸变，双馈风机转子侧变流器封锁脉冲以及撬棒电路投入，定子侧电流感应出转速频率分量，出现谐波含量变大、频率偏移现象。
- **电流穿越特性：**柔性直流输电在故障时以维持原有功率输送为控制目标，相较于光伏或风机，故障电流呈现出更明显的穿越特性。
- **等效电势变化：**受控制策略影响内电势和/或等效电源阻抗在动态过程不断发生变化，正负序阻抗不等。

二、继电保护技术挑战

挑战2：传统继电保护技术难以适应新型电力系统安全运行要求

□ 依赖于同步机电源特性的故障分析方法不再适用、保护原理受到挑战

1、故障时等效电势变化导致叠加原理不再适用

如：工频变化量距离、突变量电流选相。

2、故障时控制策略作用导致等效电源正负序阻抗变化

如：负序方向元件，电流序分量选相元件。

3、故障电流幅值受限、相位受控导致保护可靠性与灵敏性下降

距离保护极化电压不能表征提供短路电流的电源电压，距离保护近区故障失去方向性，对侧电流助增超越和拒动现象更加严重；差动保护因穿越特征造成全量差动保护灵敏度下降，谐波造成基于波形辨识的变压器差动保护误闭锁。

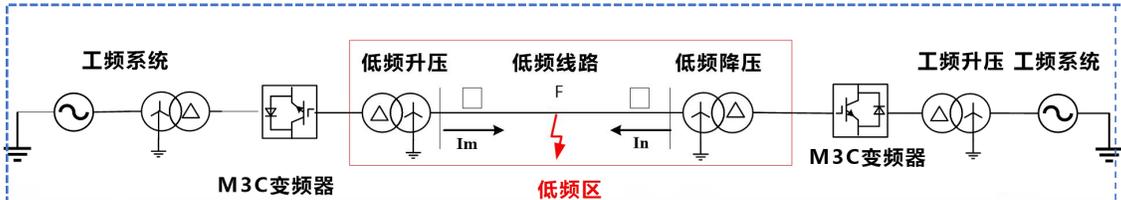
□ 大型电力变压器保护难以满足保护自身设备安全运行的要求

保护不能反应内部严重缺陷或轻微匝间故障，导致突然转变为贯穿性故障，变压器严重损毁甚至起火爆炸事故仍有发生。

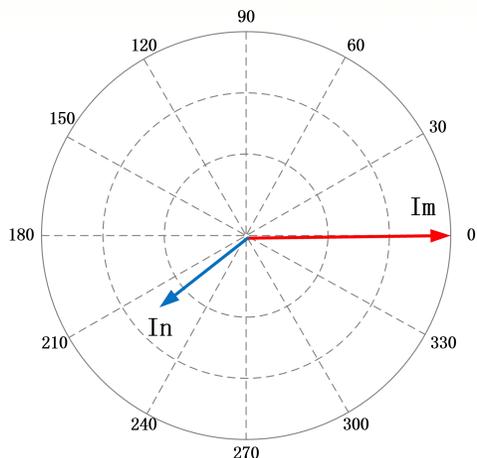
二、继电保护技术挑战

挑战2：传统继电保护技术难以适应新型电力系统安全运行要求

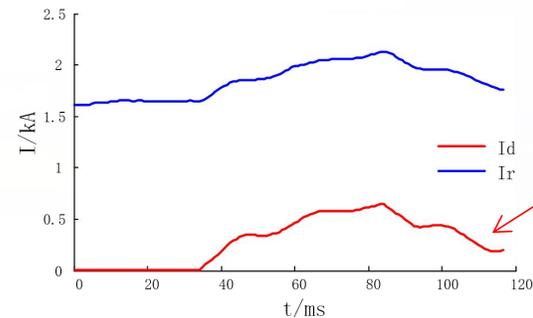
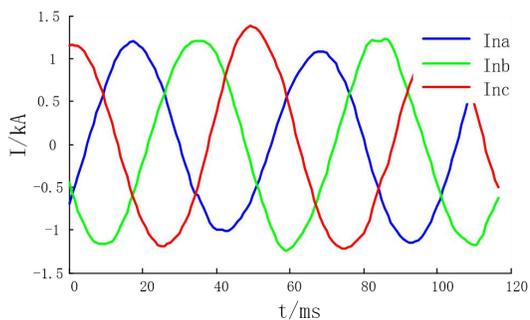
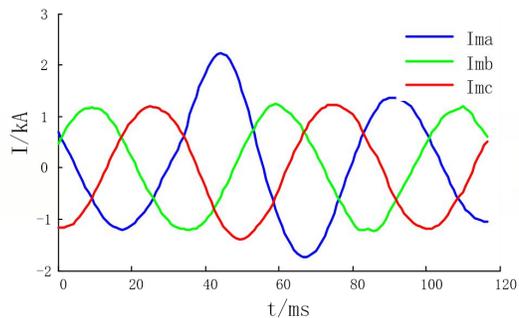
- 线路差动保护：**线路双端接入电力电子设备时，**故障电流幅值和相角受控**，弱馈特性明显，控制策略以维持功率传送为控制目标，导致穿越性负荷电流占比大，可能造成**相量电流差动灵敏性不足而拒动**；故障分量电流差动灵敏度能满足要求。



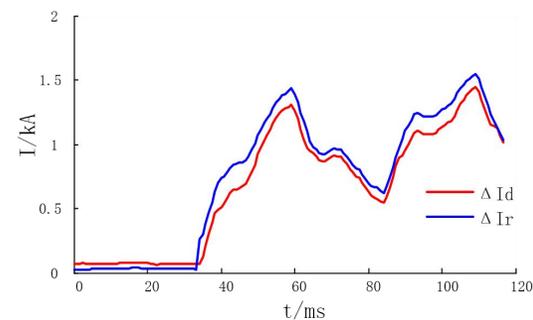
线路中点 (F点) AN故障



故障后50ms时线路两侧电流相量图



相量差动电流远小于制动电流

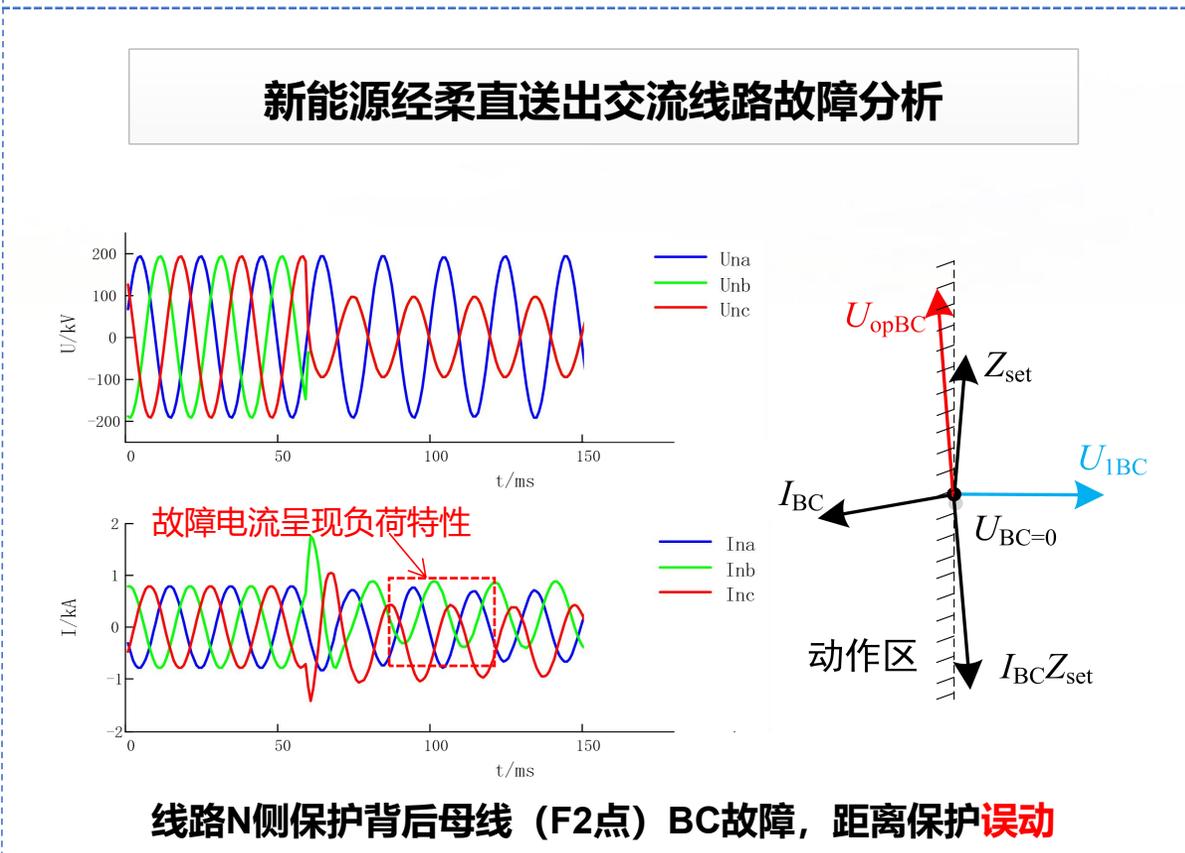
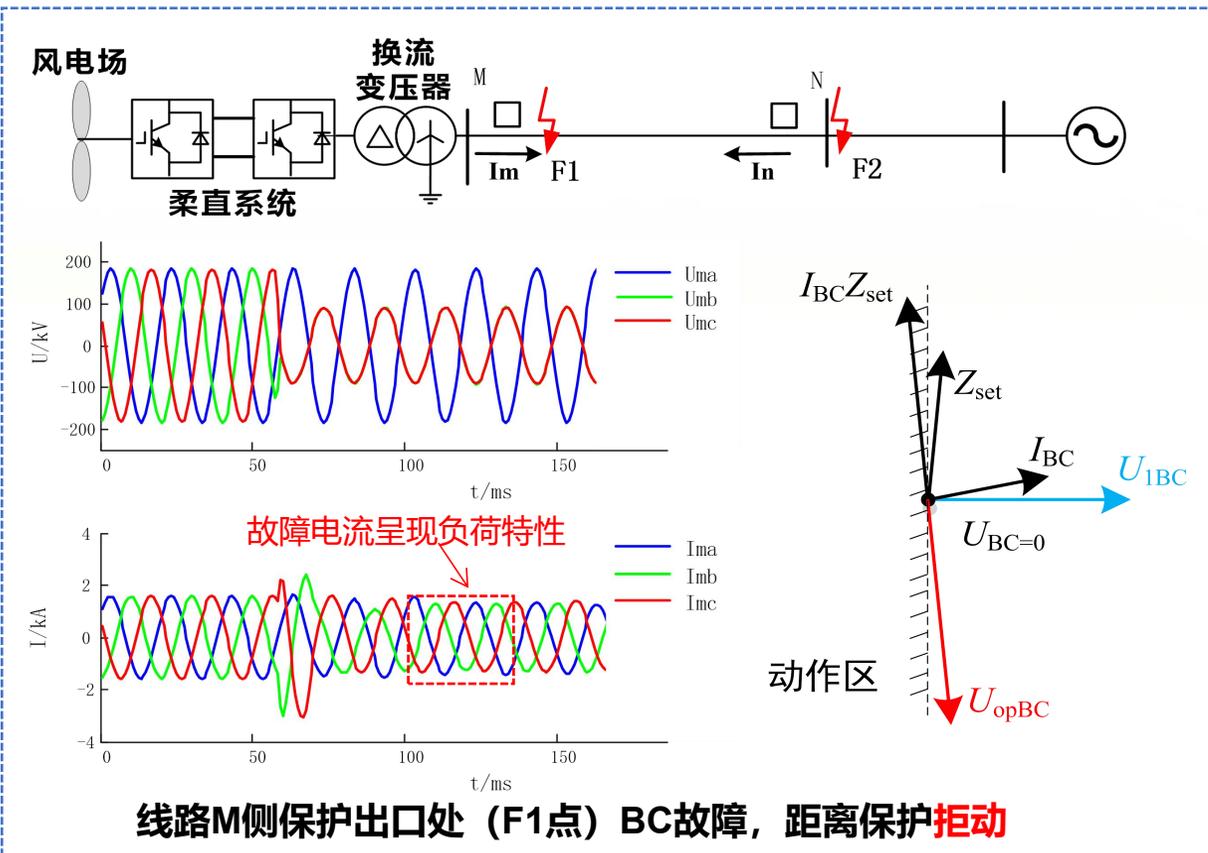


故障分量差动电流与制动电流基本一致

二、继电保护技术挑战

挑战2：传统继电保护技术难以适应新型电力系统安全运行要求

□ **线路距离保护适应性—出口正反向故障方向误判：** 新能源或柔直送出交流线路出口发生正反向短路故障，因控制策略以维持功率传送为控制目标，造成新能源短路电流源与比相式距离保护的极化电压源不一致、故障电流呈明显负荷特性，可能导致保护送端出口拒动，受端反方向出口误动。



二、继电保护技术挑战

挑战2：传统继电保护技术难以适应新型电力系统安全运行要求

□ 线路距离保护适应性—过渡电阻问题：线路发生经过渡电阻短路故障时，过渡电阻对距离保护性能的影响在受控电源接入系统时被放大。受控电源侧：系统侧电流的助增作用较强，距离保护动作范围易受影响；系统侧保护：受控电源电流助增作用较弱，距离动作范围影响较小。

➤ 过渡电阻对电力电子设备侧距离保护的影响：

单相接地经过渡电阻 R_g 故障

$$Z_A = \frac{\dot{U}_{mA}}{\dot{I}_{mA} + k3\dot{I}_{m0}} = Z_{MF_A} + R_g \frac{\dot{I}_{mA} + \dot{I}_{nA}}{\dot{I}_{mA} + k3\dot{I}_{m0}} = Z_{MF_A} + Z_{add}$$

对于柔直系统接入电网，附加阻抗为 $Z_{add} \approx \frac{1}{C_{0m}} R_g$ 。

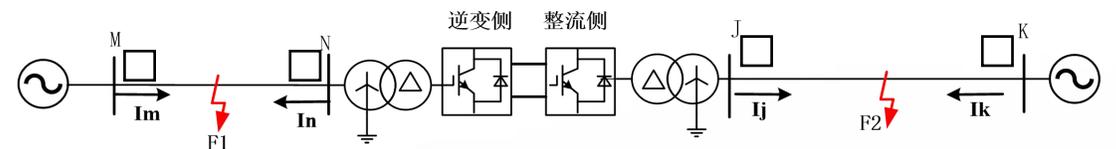
相间经过渡电阻 R_{ph} 故障

$$Z_{AB} = \frac{U_{mAB}}{\dot{I}_{mAB}} = Z_{MF_AB} + R_{ph} \frac{\dot{I}_{mA} + \dot{I}_{nA}}{\dot{I}_{mAB}} = Z_{MF_AB} + Z_{add}$$

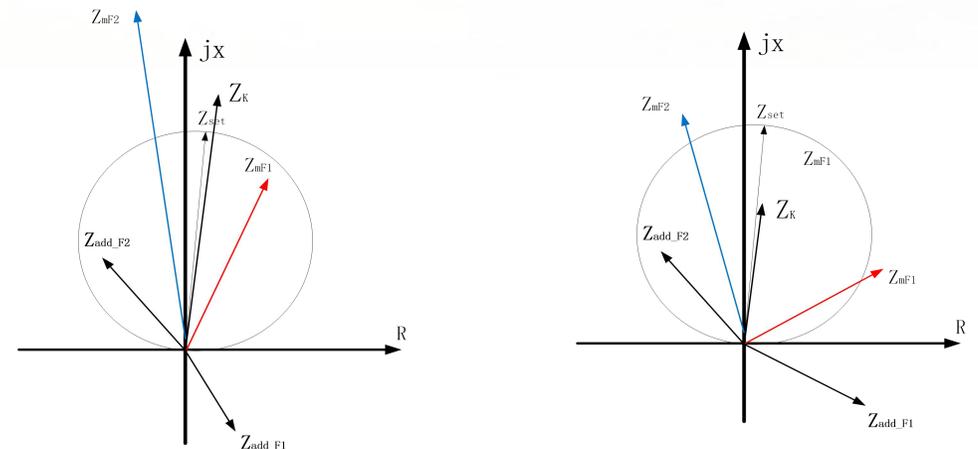
柔直系统的弱馈特性造成 I_{mAB} 较小，且 $(I_{mA}+I_{nA})$ 相位受柔直输送功率的方向及有功、无功比例影响，可能造成附加阻抗 Z_{add} 的幅值较大，角度偏差大，导致距离保护动作异常。

➤ 过渡电阻对系统侧距离保护的影响：

电力电子设备侧电流对系统侧过渡电阻助增作用较弱，距离保护影响较小



F1、F2点相间经小过渡电阻故障

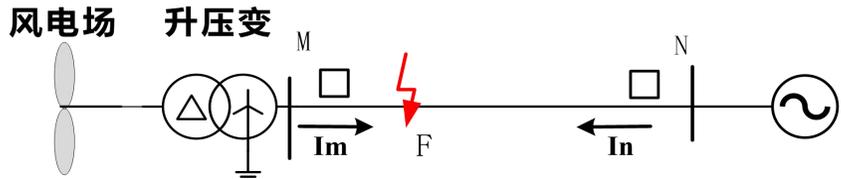


逆变侧故障时，附加阻抗在第四象限，易造成区外故障距离保护超越或区内故障保护拒动；整流侧故障时，附加阻抗在第二象限，易造成距离保护拒动。

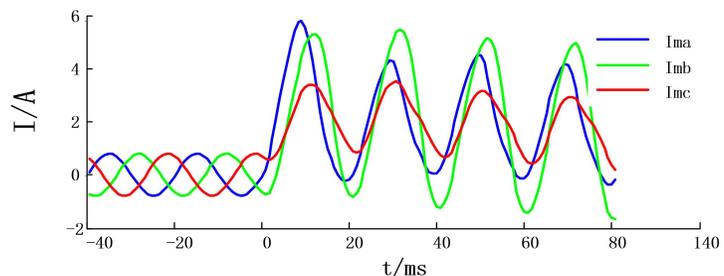
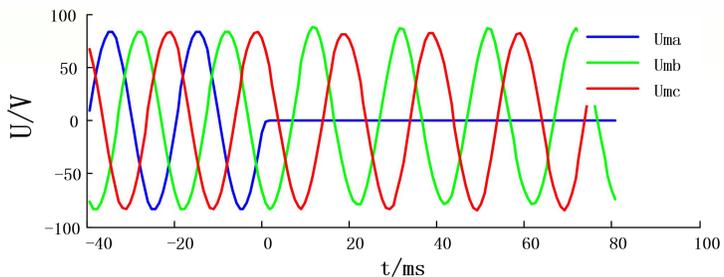
二、继电保护技术挑战

挑战2：传统继电保护技术难以适应新型电力系统安全运行要求

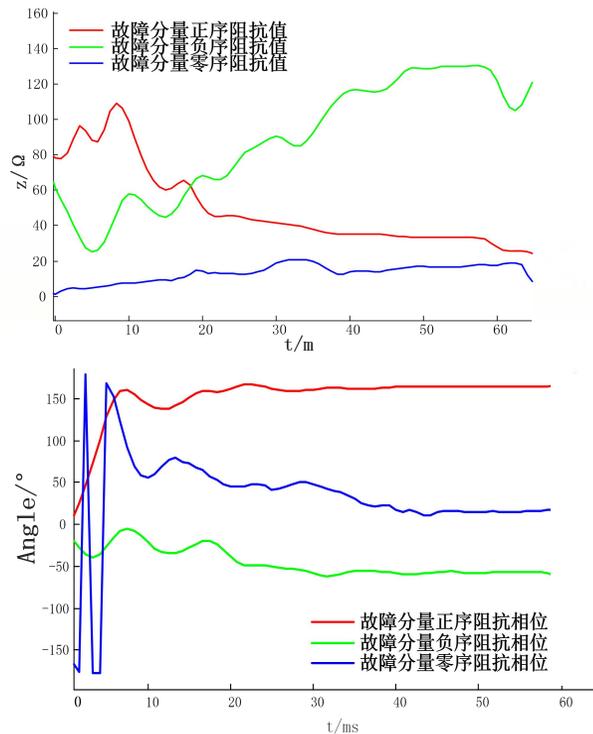
□ 线路距离保护适应性—选相问题：故障时新能源系统等值正、负序阻抗相差较大且存在较大波动性，电流序分量的分配关系发生变化，基于电流序分量及故障分量的选相结果不正确。



M侧出口处F点AN故障

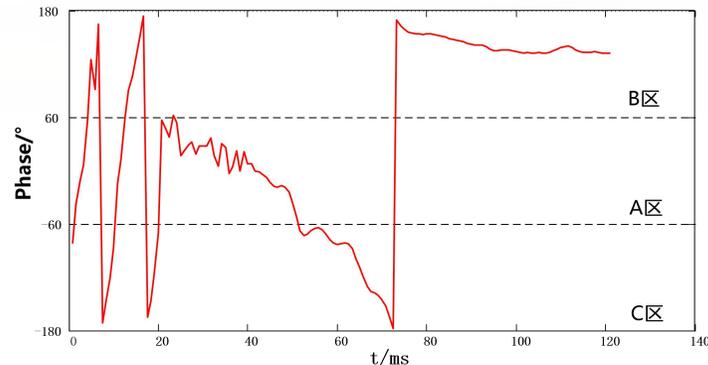


线路M侧保护电气量



M侧背后系统等值正序阻抗与负序阻抗幅值和角度差异较大且有较大波动

电流序分量选相



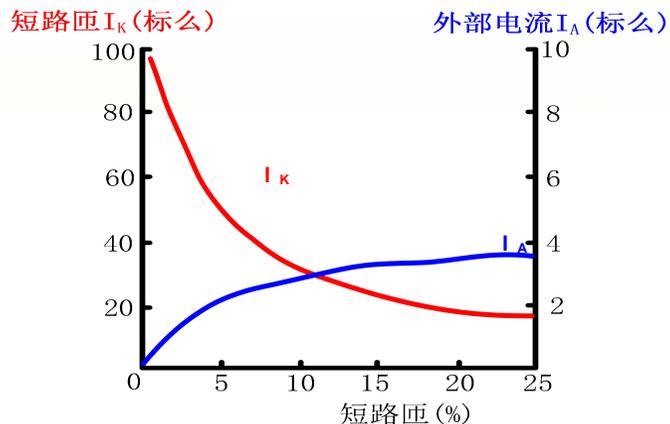
选相错误

二、继电保护技术挑战

挑战2：传统继电保护技术难以适应新型电力系统安全运行要求

- **变压器保护难以满足保护自身设备安全运行要求：**轻微匝间短路时匝内电流大、破坏性强，但保护感受到的电气量变化微弱；对于内部严重缺陷难以反应，一旦突然发展为高能量的贯穿性故障，即使保护快速动作，也不能避免变压器严重损坏甚至起火爆炸。

匝内外电流对比



不同短路匝比下短路匝内电流和外部感受电流对比图

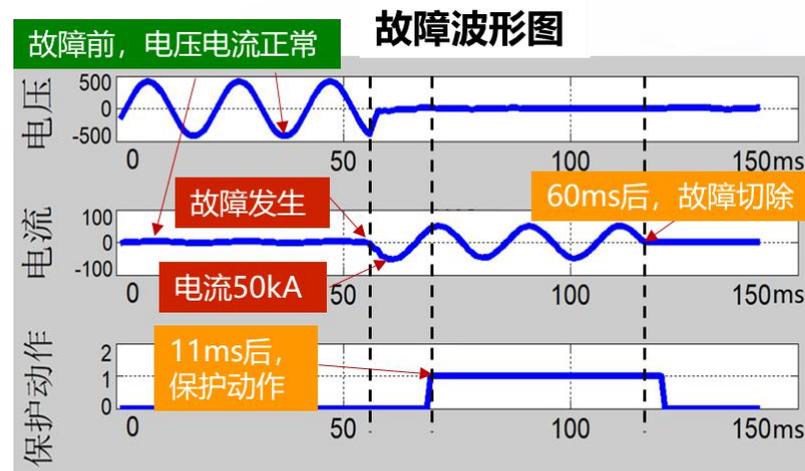
—摘自《大型机组继电保护理论基础》

现有针对故障跳闸的保护

✓ **电流差动保护：**局限于变压器端部引线电气量特征，灵敏度提高已到极限，**满足系统安全对保护的要求，却无法检测到内部严重缺陷或早期故障。**

✓ **重瓦斯继电器：**动作速度慢、灵敏度低。由于绝缘油粘滞性和可压缩性，变压器内部电弧故障引起油流涌动传播速度慢。

某特高压换流变故障案例

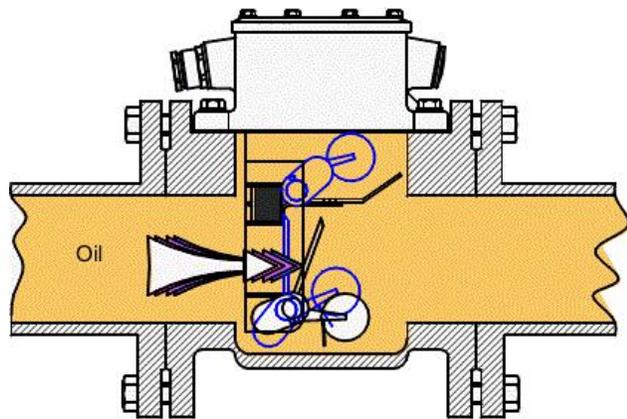
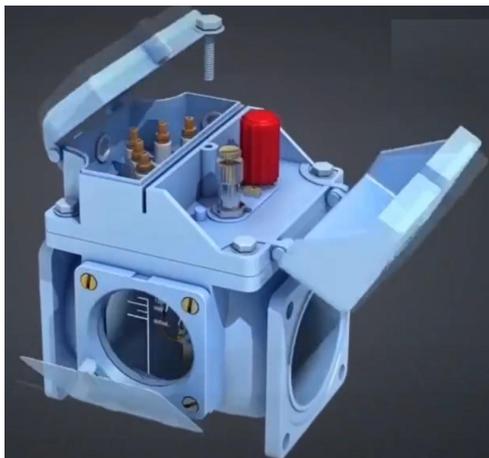


- 短路故障发生前，变压器端部电压电流无任何故障特征。
- 短路故障发生时，故障电流陡升至50kA。
- 保护11ms快速动作，60ms断路器跳开切除变压器。
- 巨大的故障电弧能量形成高温、高压，造成变压器爆裂，引起起火。

二、继电保护技术挑战

挑战2：传统继电保护技术难以适应新型电力系统安全运行要求

- **变压器保护难以满足保护自身设备安全运行要求：反应变压器内部故障的瓦斯继电器，重瓦斯动作速度慢，轻瓦斯告警后需进一步确认是否发生故障，现场取气分析易对人身安全带来隐患。**



重瓦斯跳闸：反应油流涌动速度，动作慢且灵敏度低。因绝缘油粘滞性和可压缩性，变压器内部电弧故障引起油流涌动传播速度慢且灵敏度低。

4.7 变压器（电抗器）轻瓦斯动作

4.7.1 现象

- 监控系统发出变压器（电抗器）轻瓦斯保护告警信息。
- 保护装置发出变压器（电抗器）轻瓦斯保护告警信息。
- 变压器（电抗器）气体继电器内部有气体积累。

4.7.2 处理原则

- 轻瓦斯动作发信时，应立即对变压器（电抗器）进行检查，查明动作原因，是否因聚集气体、油位降低、二次回路故障或是变压器（电抗器）内部故障造成。
- 若轻瓦斯报警信号连续发出2次及以上，可能说明故障正在发展，应申请尽快停运。
- 如气体继电器内有气体，应立即取气并进行气体成分分析；同时应立即启动在线色谱装置分析或就近送油样进行分析。
- 若检测气体是可燃的或油中溶解气体分析结果异常，应立即申请将变压器（电抗器）停运。
- 若检测气体继电器内的气体为无色、无臭且不可燃，且油色谱分析正常，则变压器（电抗器）可继续运行，并及时消除进气缺陷。
- 在取气及油色谱分析过程中，应高度注意人身安全，严防设备突发故障。

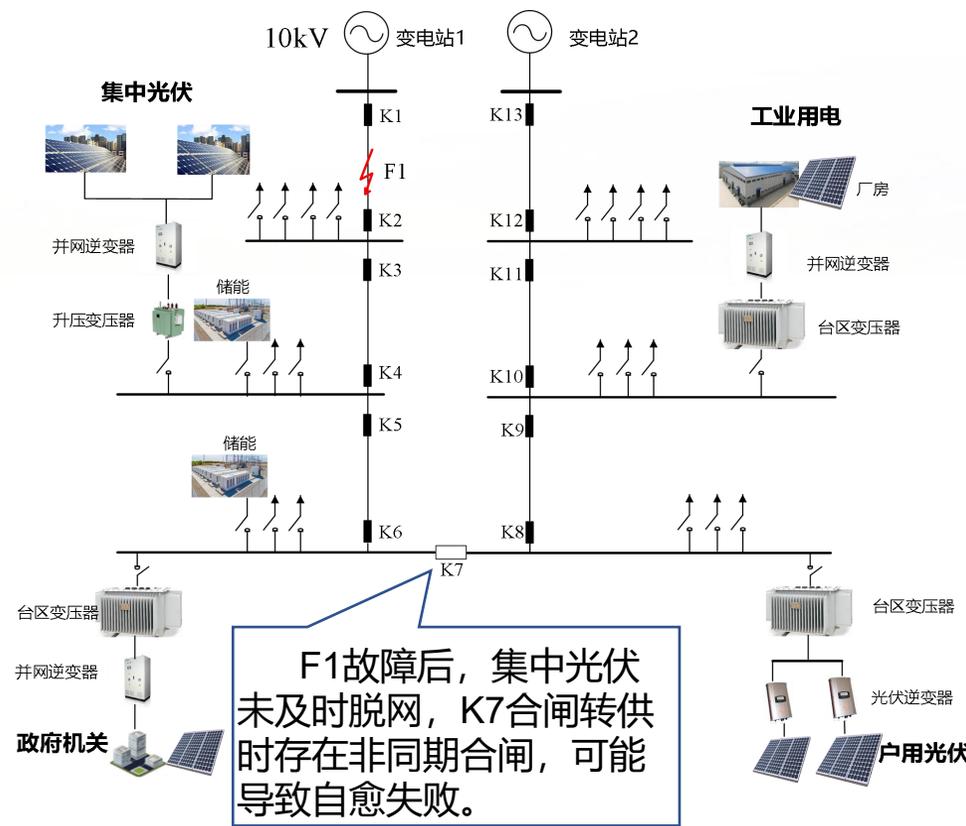
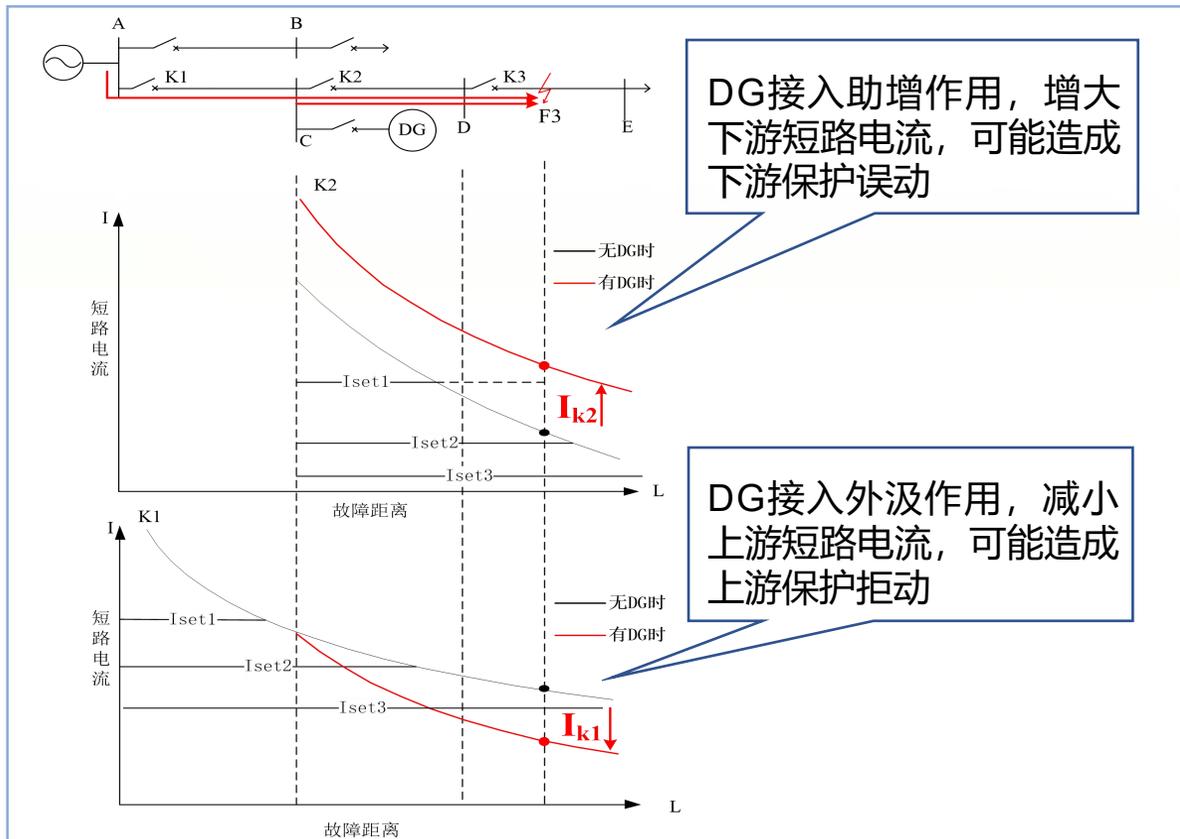


轻瓦斯告警：反应油分解的气体压力，灵敏度高；防误动仅告警，规程规定为进一步确认是否为故障，需进行人工取气进行分析，待确认后变压器再停运，就近操作过程会对人身安全带来隐患。

二、继电保护技术挑战

挑战3：分布式电源影响配电网故障快速隔离和自愈

- 分布式新能源、储能等多类型电源接入使得配电网拓扑结构复杂，潮流双向流动，传统配电网保护逐级整定配合困难无法适用；配网单相接地故障识别、区段定位困难，需要变电站装置整线切除故障线路，扩大停电范围；非同期合闸可能导致自愈失败。



一 新型电力系统形态

二 继电保护技术挑战

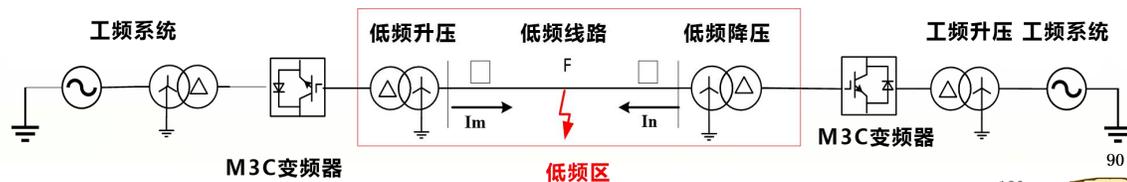
三 继电保护新技术探索

四 总结与展望

三、继电保护新技术探索

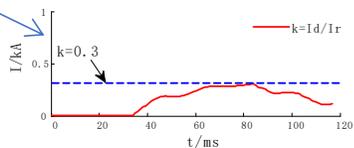
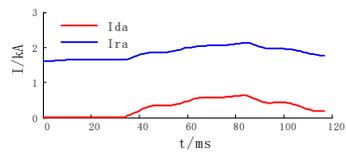
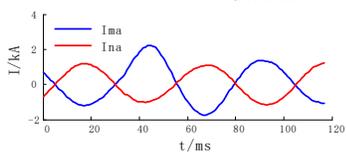
基于幅相平面的三区域差动保护

- 利用两端电流幅值、相位关系构建**基于幅相平面的三区域差动保护**，制动区范围**仅需考虑线路两侧CT误差、同步误差的影响**；
- 解决传统相量差动应用于线路双端均是电力电子设备时，因故障电流受限、穿越性负荷电流占比大，导致保护灵敏度不足的问题。



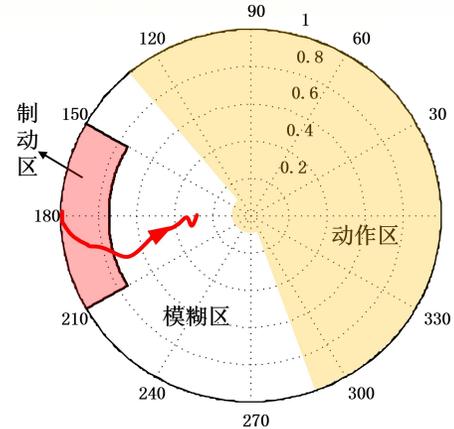
柔性低频输电系统交流线路

M3C变频器

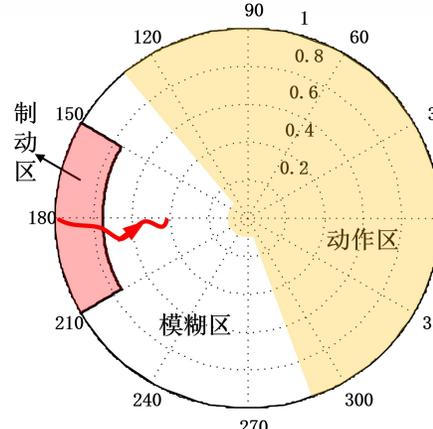


传统相量
差动比率
<math><0.3</math>

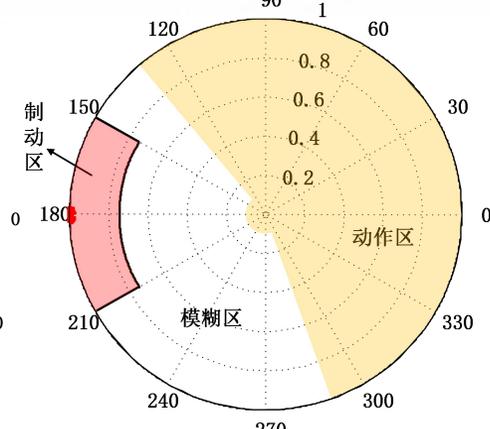
线路中点 (F1点) AN故障



线路中点 (F1点) AN故障,
保护**快速动作**



线路中点 (F1点) 经100Ω过
渡电阻AN故障, 保护**快速动作**



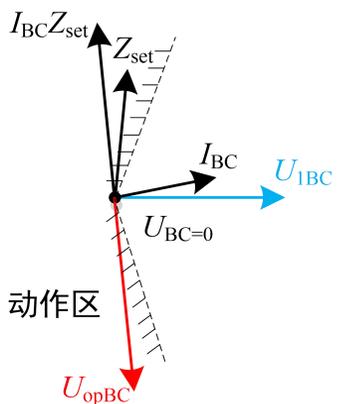
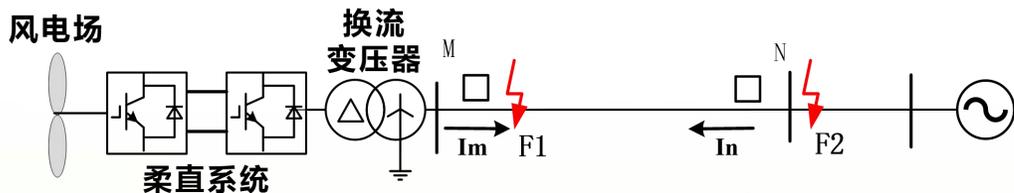
母线 (F2点) AN故障,
保护**不动作**

三、继电保护新技术探索

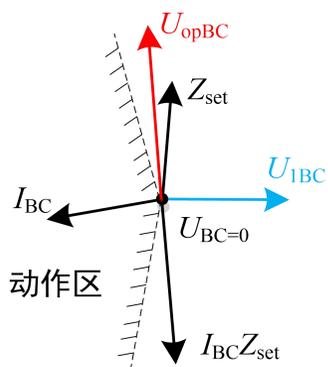
结合暂态信息的自适应距离保护

- 故障后数ms电气量不受电力电子设备控制策略的影响，基于此构造**暂态时域信息的快速方向元件**
- 根据方向信息动态调整距离保护动作特性，解决短路电流源与极化电压源不一致造成距离保护在近区相间短路拒动误动问题

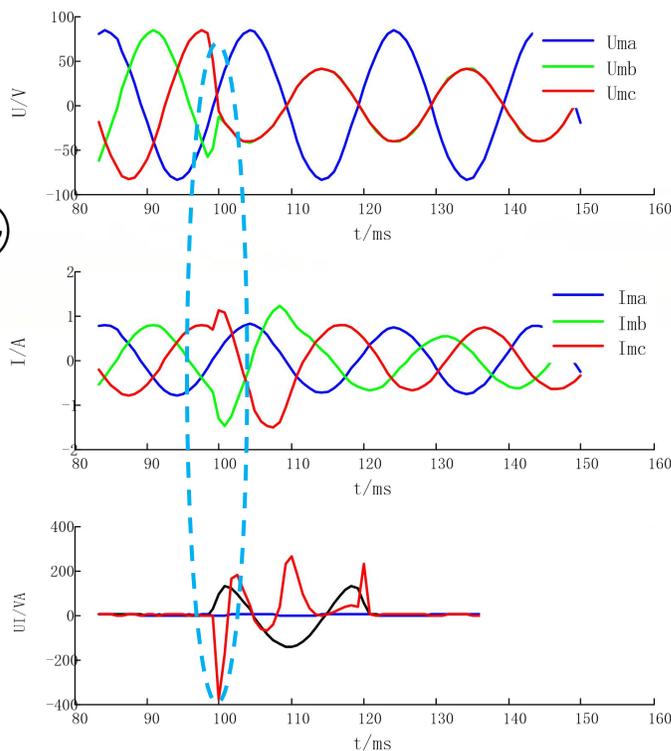
新能源经柔直送出的交流线路



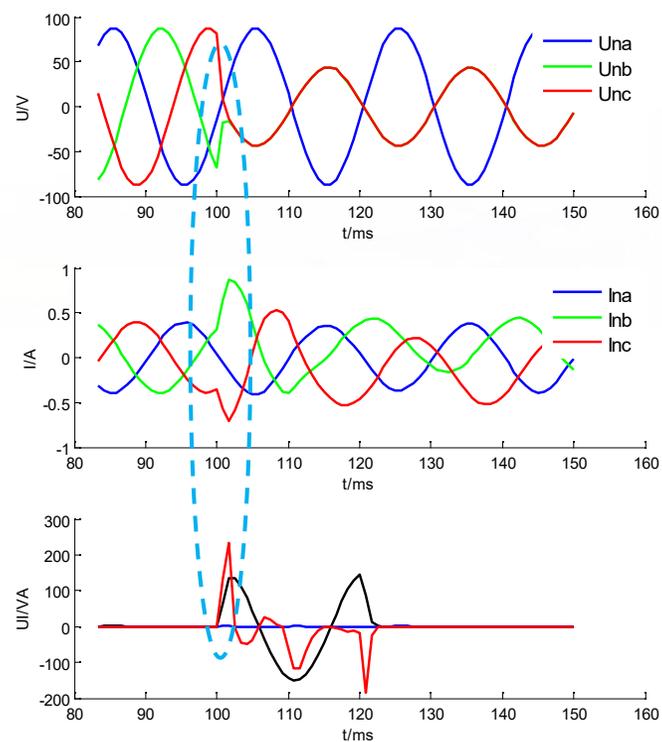
判为正方向时，适当扩大动作范围，**距离保护不拒动**，并提高抗过渡电阻能力



判为反方向时，适当缩小动作范围，**距离保护不误动**



M侧线路保护出口处 (F1点) BC故障，判出**正方向**



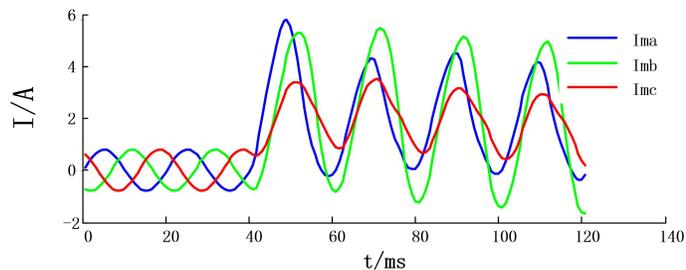
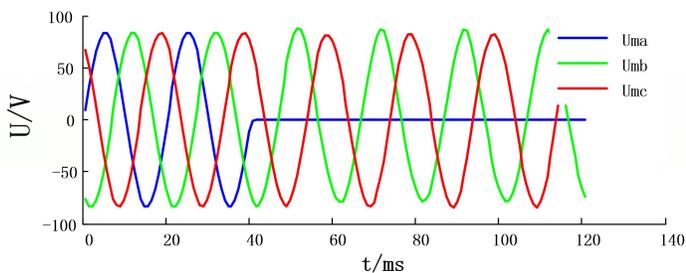
N侧线路保护背后母线 (F2点) BC故障，判出**反方向**

三、继电保护新技术探索

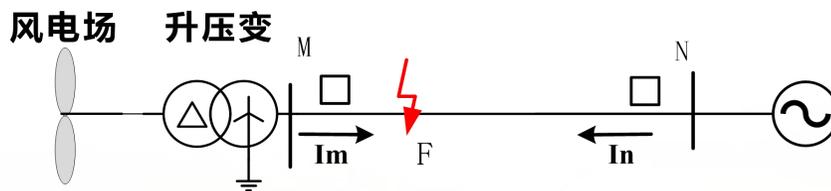
电压量选相元件

对于新能源送出的交流线路，故障期间电压主要由系统侧决定，保护安装处电压与故障点电压基本同相位。据此**利用电压量构建选相元件**，避免了受控电源侧送出线路中电流序分量可能误选相问题

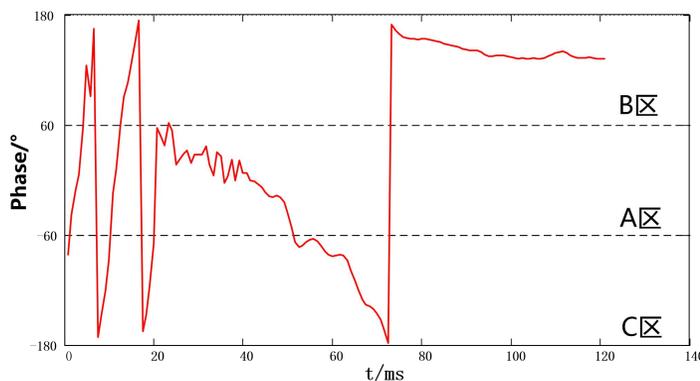
电压序分量选相



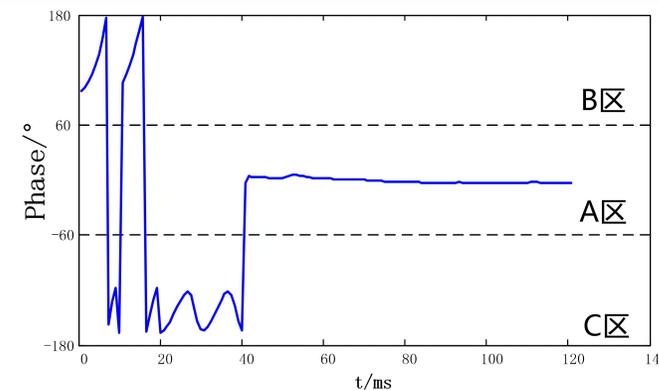
线路M侧保护电气量



M侧出口处F点AN故障



电流序分量选相错误

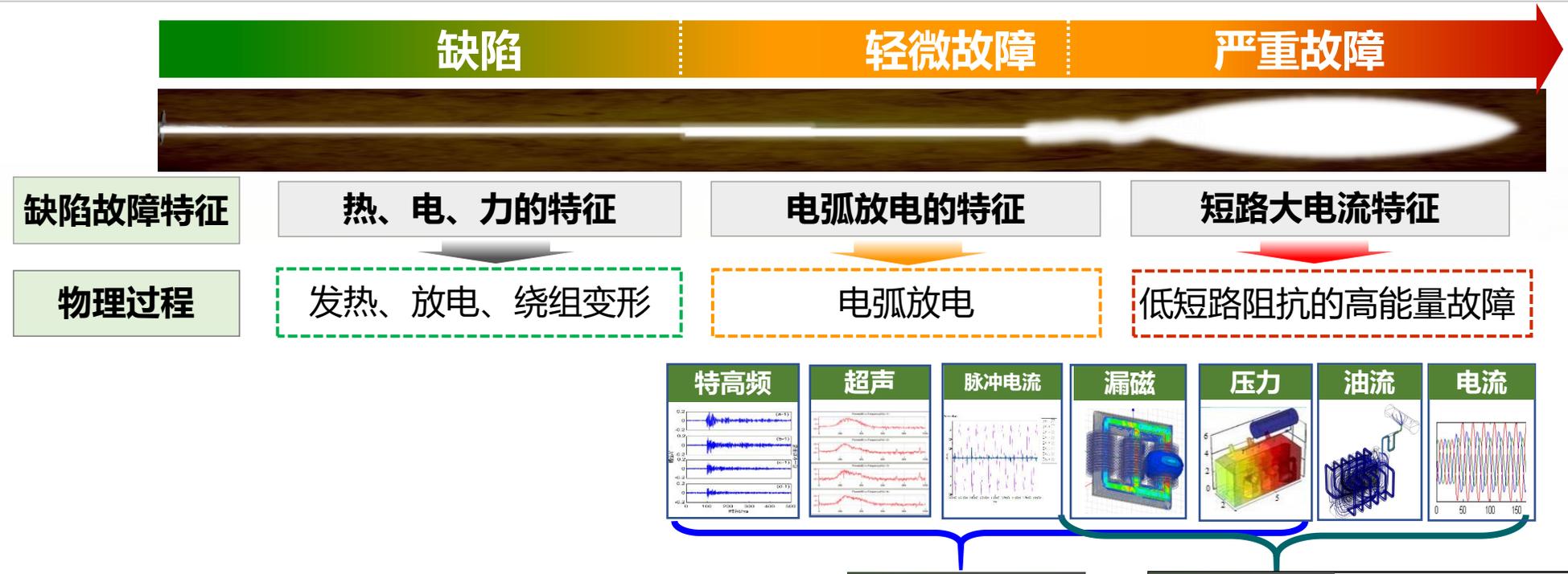


电压序分量正确选A相

三、继电保护新技术探索

大型电力变压器主动保护技术思路

变“被动”为“主动”，依据变压器内部故障存在着渐进发展过程，通过多学科交叉融合，探索变压器内部故障演化规律、外部扰动对故障表征参量影响机理，构建多物理场多维特征的大型电力变压器主动保护技术，实现变压器早期严重缺陷和轻微故障辨识，提升设备安全运行水平。



如果在内部高能量电弧故障产生前100ms保护跳闸，即可避免发生爆炸起火事故的风险。

早期轻微故障
准确辨识

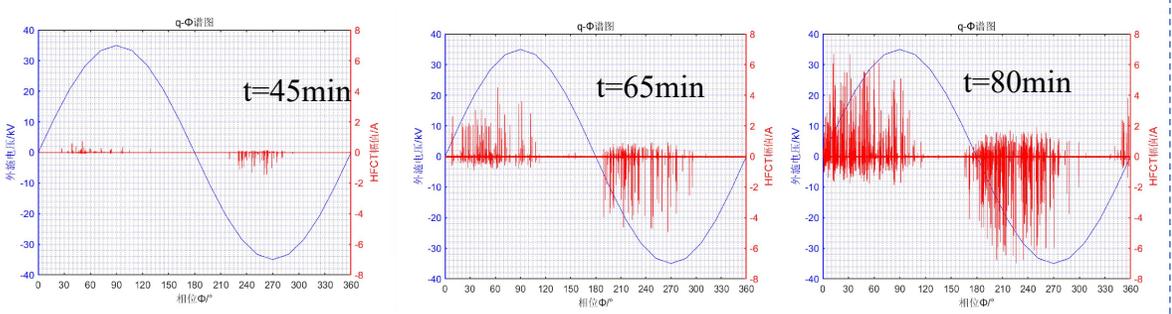
严重故障
快速保护

改进、完善
差动和瓦斯保护

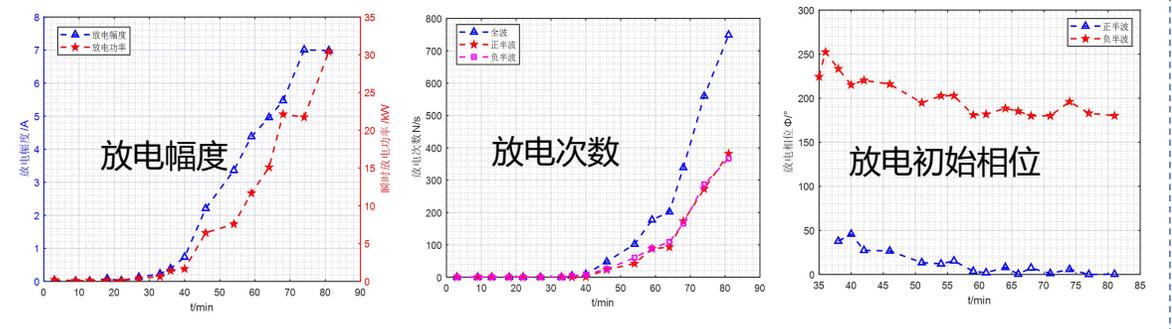
三、继电保护新技术探索

大型电力变压器主动保护技术---基于脉冲电流和超声特征信息的变压器保护技术

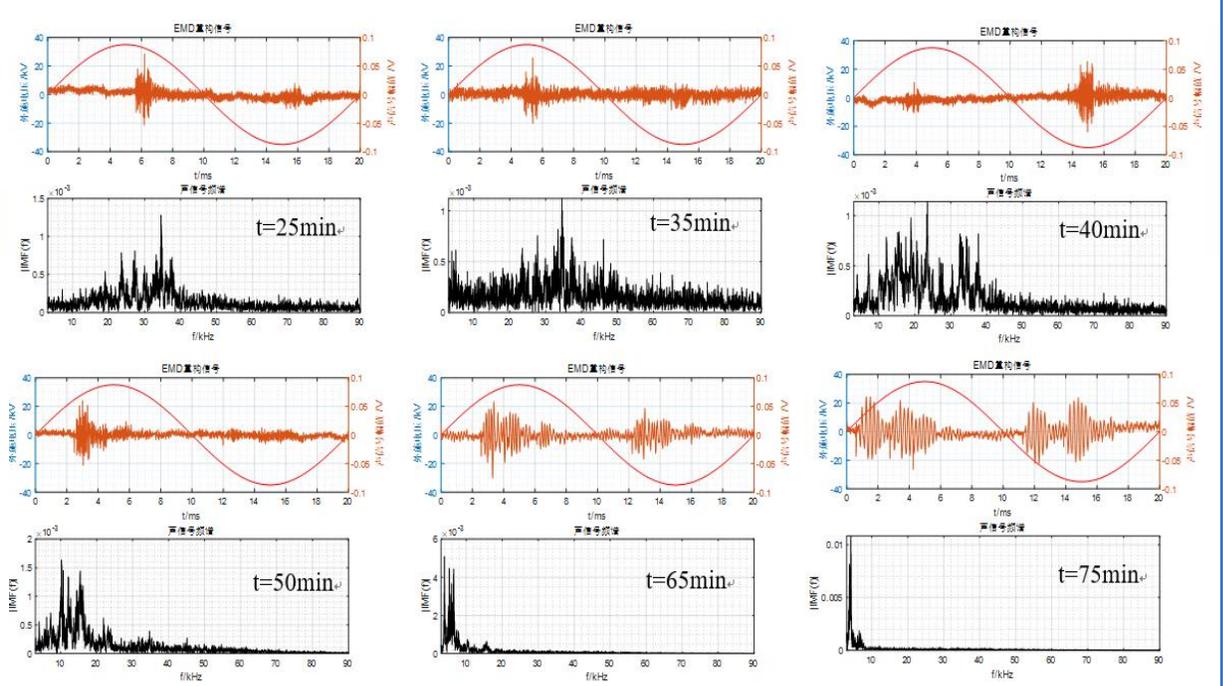
- 局部放电发展至持续电弧放电故障特征规律
 - 脉冲电流信号：**放电次数和幅值增加**，放电**初始相位左移过零**的特征。
 - 声信号：**声信号主频率分量下降**，涵盖**可闻声和低频段超声**等特征。



脉冲电流 α - ω 谱图



脉冲电流特征分析



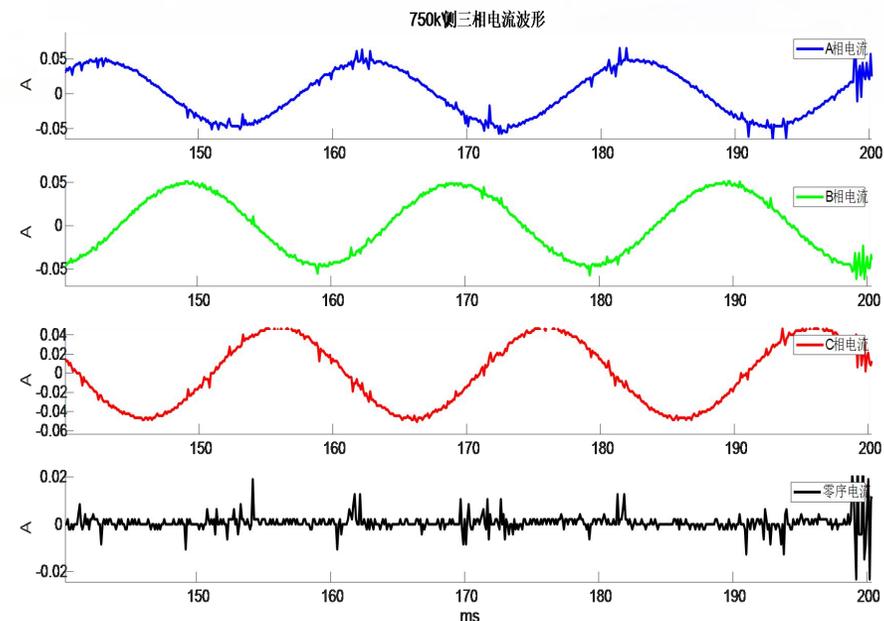
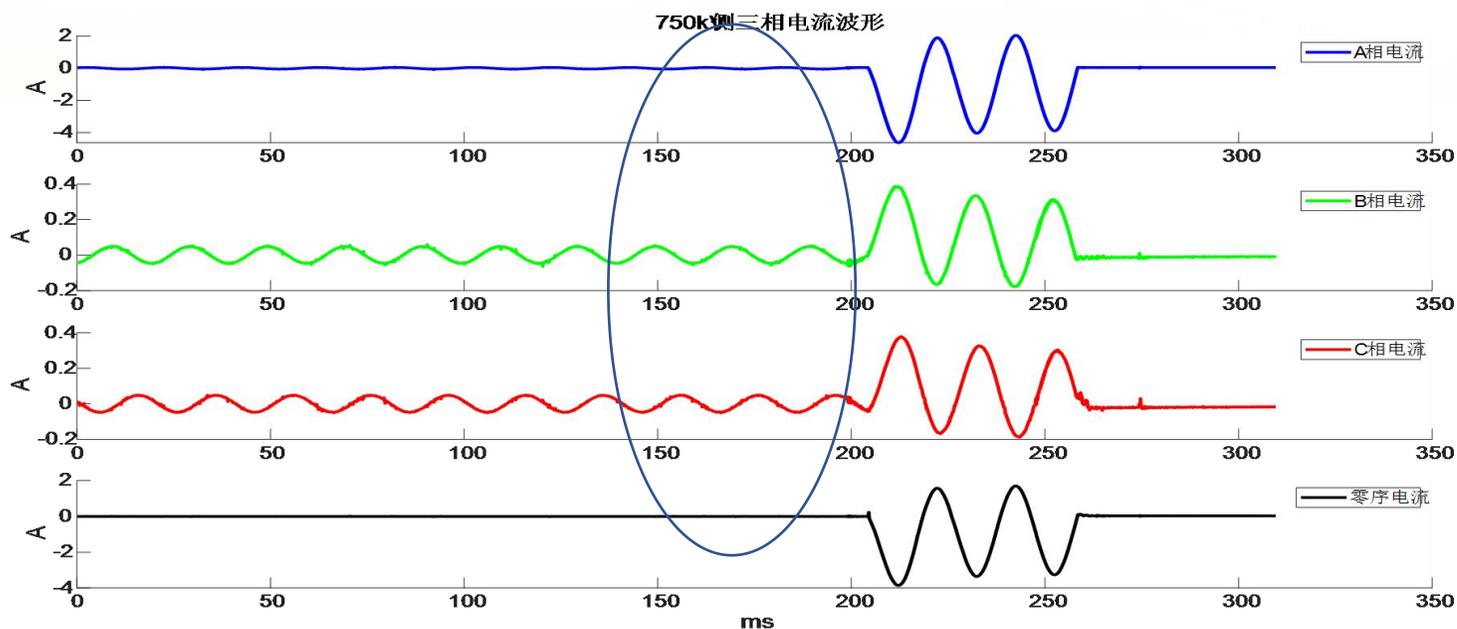
声信号时频特性

三、继电保护新技术探索

大型电力变压器主动保护技术---基于脉冲电流和超声特征信息的变压器保护技术

- 脉冲电流**数字式多频段方向继电器**区分变压器内外部放电；
- 利用脉冲电流、声音等特征信息反应放电发展规律，判断是否即将发生贯穿性高能量电弧故障。
- 还需要解决变压器绕组首末端高频脉冲电流信号的量测问题，即需要完成**适应工频大电流运行条件的大尺寸HFCT研制**。

某750kV自耦变压器500kV侧A相套管处故障



三、继电保护新技术探索

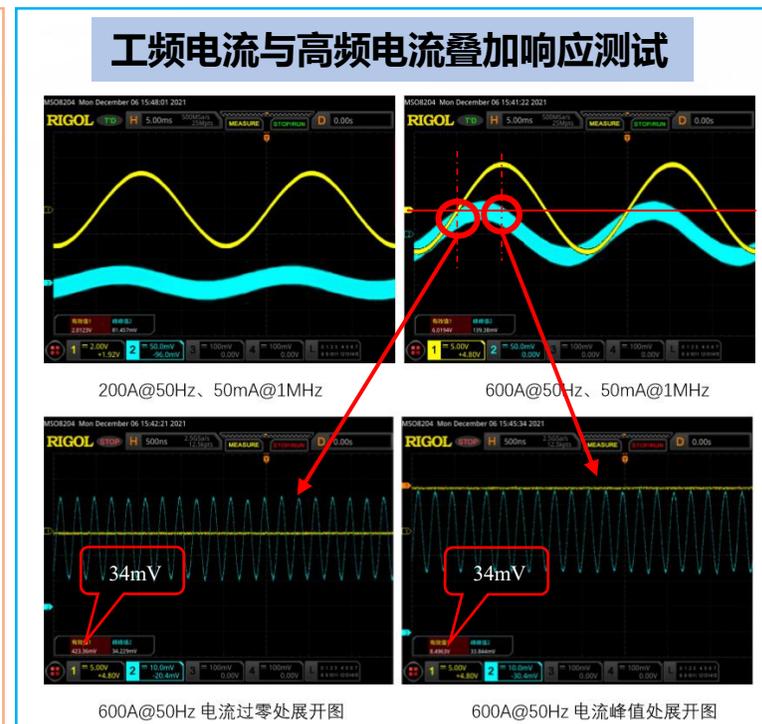
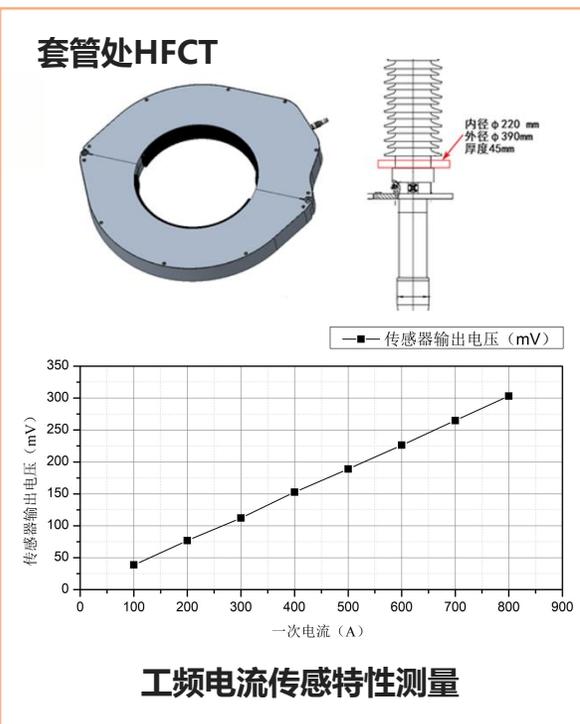
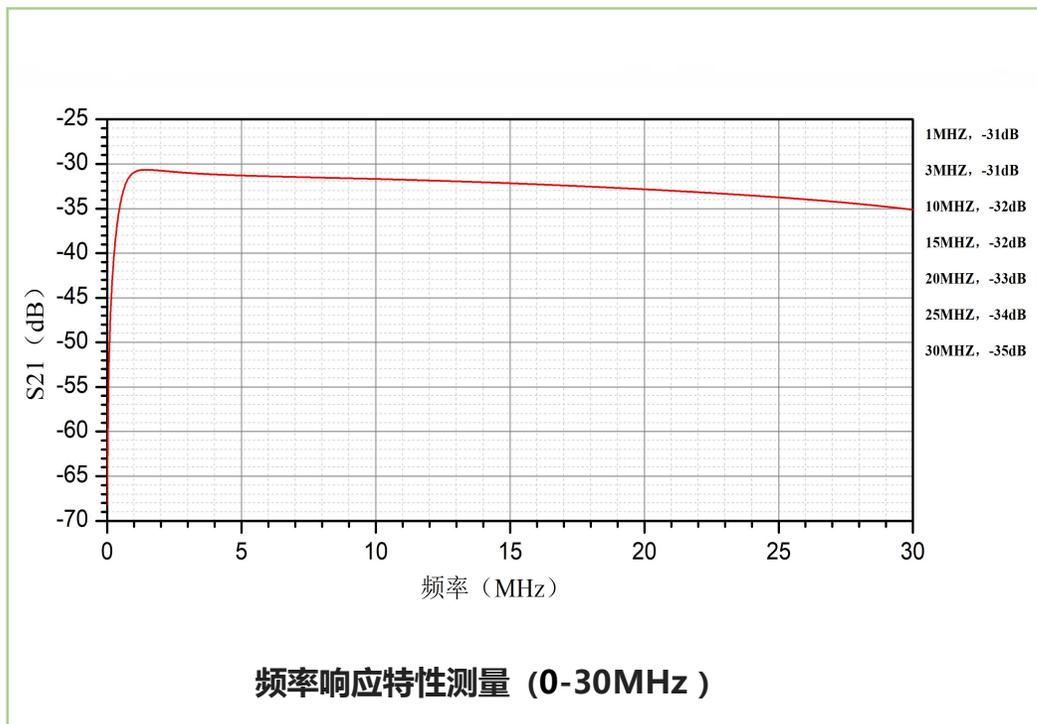
大型电力变压器主动保护技术---基于脉冲电流和超声特征信息的变压器保护技术

■ 适应工频大电流运行条件的大尺寸HFCT研制

□ **频带**: 1~30MHz频带范围内, 传输系数曲线较为平滑, -31~-35dB。

□ **尺寸**: 390mm*220mm*45mm, 安装在变压器套管上。

□ **性能**: 套管HFCT需避免正常负荷电流导致的铁芯饱和问题、大工频负荷电流下提取小高频信号电流精度问题。

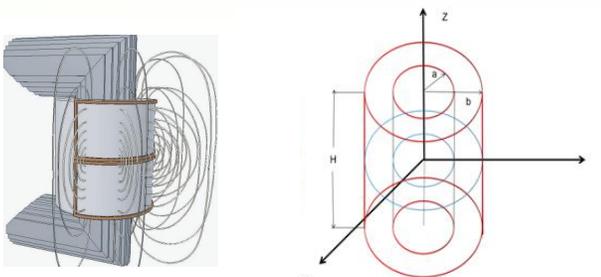


三、继电保护新技术探索

大型电力变压器主动保护技术---基于漏磁信息的变压器匝间保护技术

- 变压器漏磁通数学模型建立，**漏磁分布对称性理论分析**。
- “场-路”耦合三相变压器三维仿真模型建立，理论和仿真获取变压器正常运行、不同绕组、不同高度、不同短路匝比下的绕组漏磁分布规律。并得到：**漏磁传感器需安装在低压绕组与中压绕组之间**，根据绕组高度与设定的漏磁阈值确定传感器的**安装数量**，可灵敏快速检测到**高中低绕组1%的轻微匝间短路**。为变压器小匝间短路故障的灵敏辨识建立了理论基础。

漏磁分布数学模型

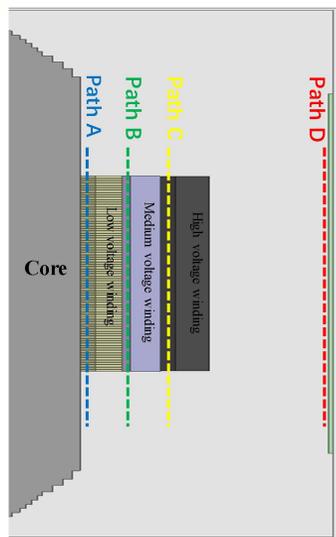


$$\vec{B}_x = \vec{e}_x \int_{-0.5H}^{0.5H} \int_a^b \int_0^{2\pi} \frac{KR(z_0 - z) \cos\theta d\theta dR dz}{((x_0 - R\cos\theta)^2 + (y_0 - R\sin\theta)^2 + (z_0 - z)^2)^{3/2}}$$

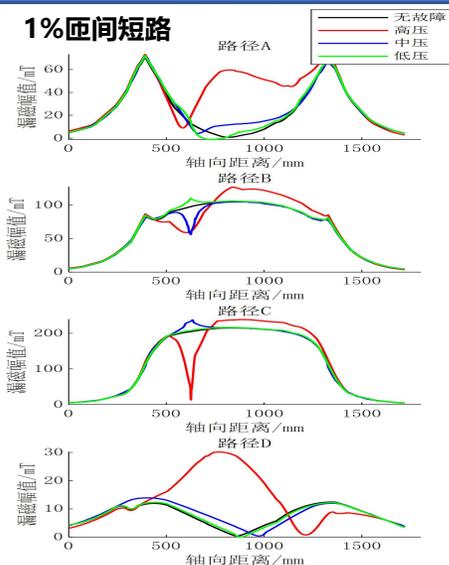
$$\vec{B}_y = \vec{e}_y \int_{-0.5H}^{0.5H} \int_a^b \int_0^{2\pi} \frac{KR(z_0 - z) (-\sin\theta) d\theta dR dz}{((x_0 - R\cos\theta)^2 + (y_0 - R\sin\theta)^2 + (z_0 - z)^2)^{3/2}}$$

$$\vec{B}_z = \vec{e}_z \int_{-0.5H}^{0.5H} \int_a^b \int_0^{2\pi} \frac{KR(-\sin\theta y_0 + R - \cos\theta x_0)}{((x_0 - R\cos\theta)^2 + (y_0 - R\sin\theta)^2 + (z_0 - z)^2)^{3/2}} d\theta dR dz$$

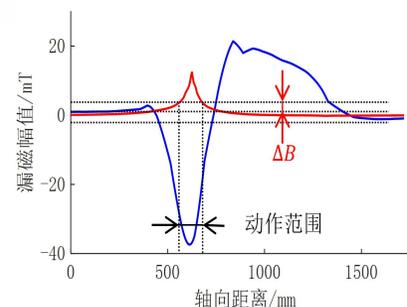
轴向漏磁测量路径



四种测量路径下轴向漏磁分布



传感器安装位置与数量



传感器感知范围与漏磁阈值关系

安装数量 $N \geq \frac{H}{R_{\Delta B}}$

安装位置 $x_n = \frac{H}{2N} (2n - 1), 1 \leq n \leq N$

三、继电保护新技术探索

大型电力变压器主动保护技术---基于游离气体特征的变压器数字式瓦斯保护技术

- 调研并分析了现有瓦斯保护误动、正确动作案例：**H₂和C₂H₂含量是衡量变压器内部故障核心指标**；
- 基于典型放电缺陷模型设计了三种放电电极模型，获得了**不同缺陷下随放电程度发展的游离气体产气规律**，发现了产气量与放电模型、视在放电量之间的关系；
- 结合油浸式变压器检修和运维技术细则，研制了**基于游离气体特征的数字式瓦斯保护装置**。

数字式瓦斯保护的设计思想：

1) 由来：

几次变压器起火爆炸事故看出：

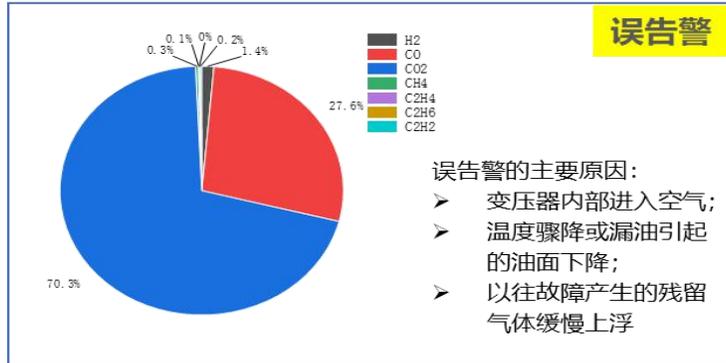
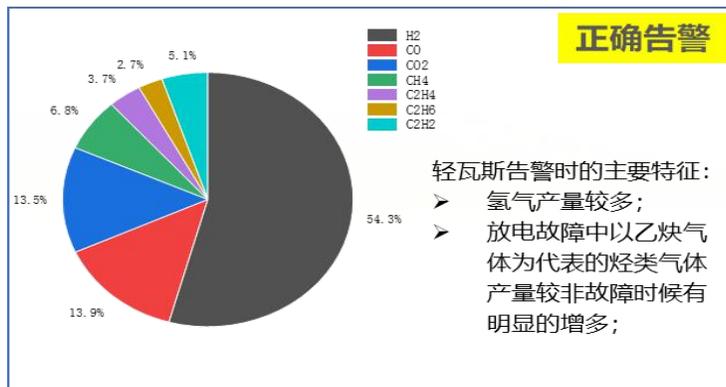
A. 轻瓦斯灵敏度远高于重瓦斯

B. 轻瓦斯告警后取气进行分析，

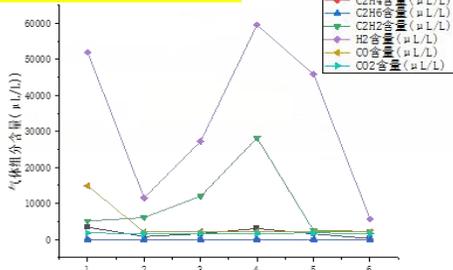
给操作人员带来安全隐患。

2) 设计思想：

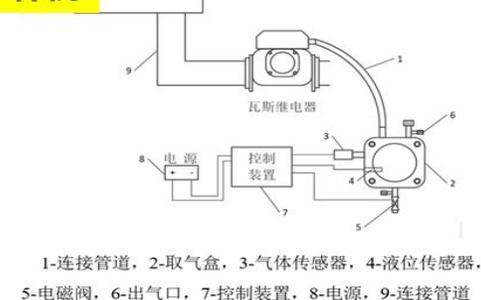
轻瓦斯告警后**自动取气、自动分析、自动诊断故障并上送报告、自动排气注油**。



放电产气规律



样机

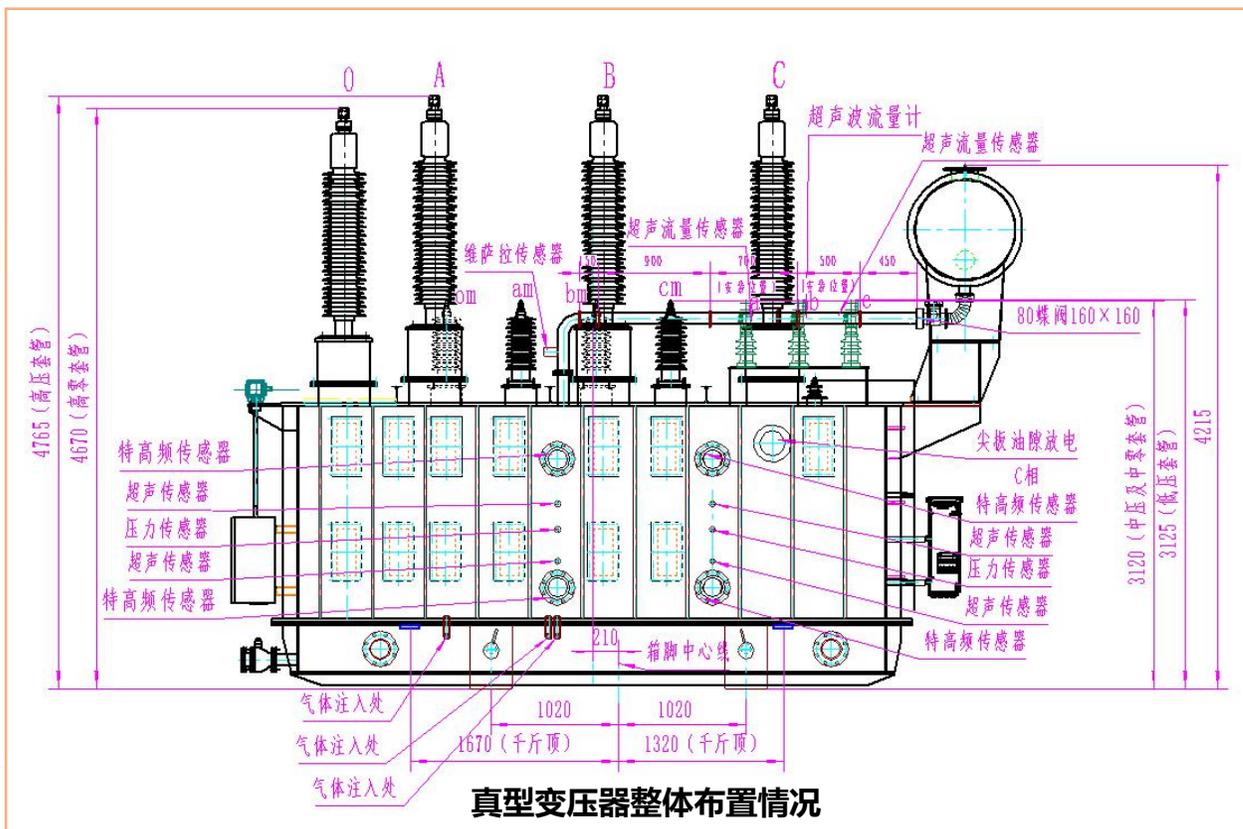


三、继电保护新技术探索

大型电力变压器主动保护技术---大型电力变压器主动保护试验技术

■ 110kV真型变压器试制及保护试验

- 设计了油中悬浮、纸板沿面、油间隙放电等**放电类缺陷**，绕组局部过热、油道堵塞等**过热类缺陷**，共计14类。
- 放置了特高频、维萨拉、压力、超声流速、超声、光纤温度、漏磁、高频CT等**各类传感器**。



真型变压器实体

三、继电保护新技术探索

大型电力变压器主动保护技术---基于变压器主磁通估算的励磁涌流识别技术

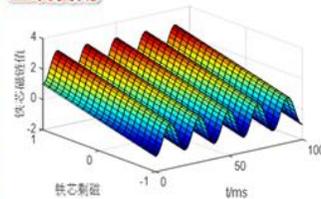
- 基于变压器绕组型式和铁芯磁化特性，**建立电压时域信息的铁芯磁链计算数学模型**，通过跟踪磁链实时估算值在磁化曲线上的运行轨迹，有效区分励磁涌流和故障场景；
- 根据铁磁材料磁滞效应，**建立基于相电压和差动电流突变量时差法的励磁涌流和故障电流识别技术**。

变压器铁芯磁链实时计算数学模型

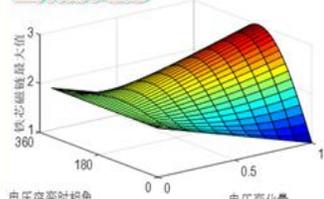
$$\psi_{2_pu}(t) = \int_{t-\frac{T}{2}}^t u_{pu}(\tau) d\tau + \int_0^t \left[u_{pu}(\tau) + u_{pu}\left(\tau - \frac{T}{2}\right) \right] d\tau + \psi_{r_pu}$$

揭示了铁芯磁链与电压突变特征的内在关联规律

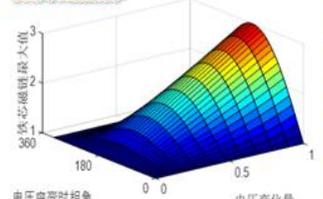
空载合闸



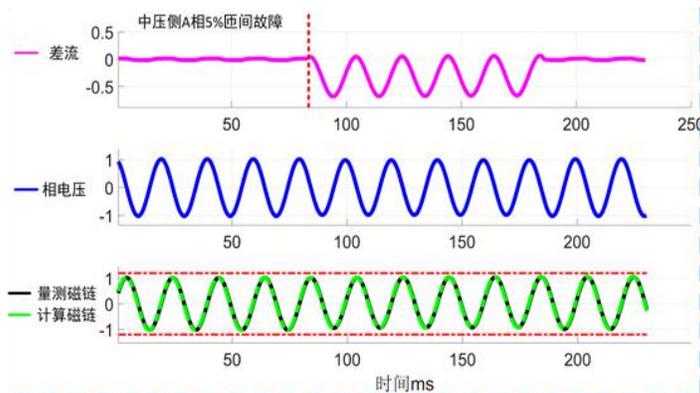
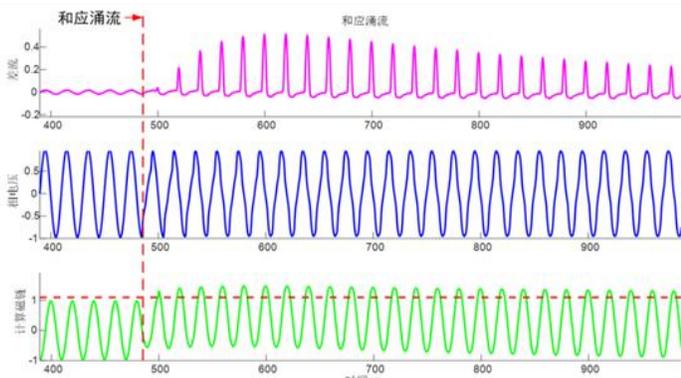
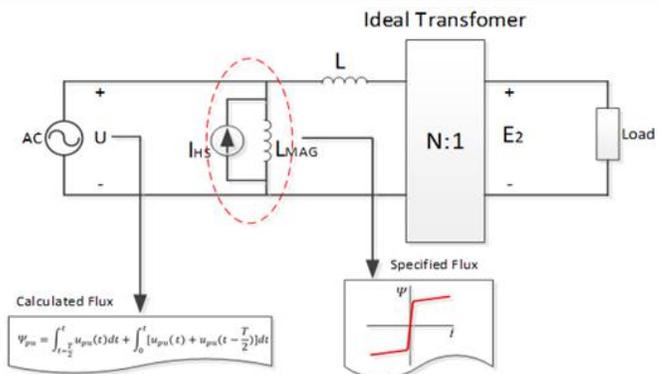
区外故障切除



故障或操作



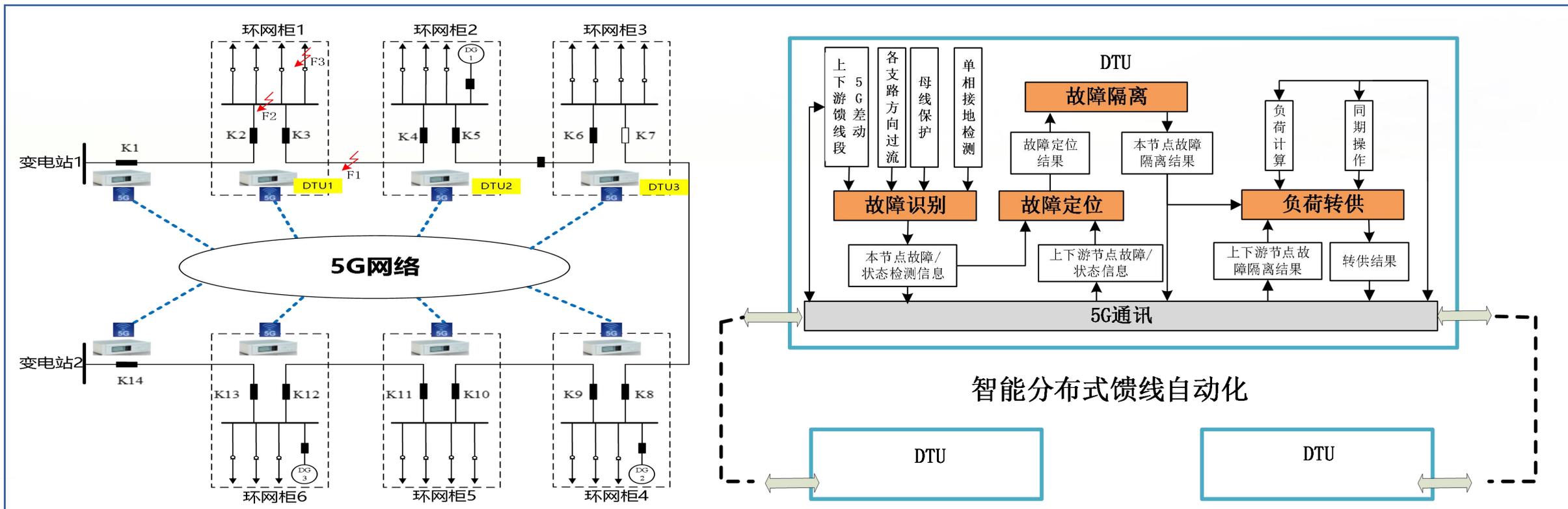
RTDS
系统直
接量测
和本方
法计算
磁链值
仿真示
意图



三、继电保护新技术探索

基于5G通信的配网故障快速隔离与自愈技术

- 基于**5G通信的线路差动保护**实现配网馈线故障的快速定位与区段隔离，通过**时频域和邻域信息**实现单相接地故障快速定位与隔离，基于**5G通信的协同控制技术**实现配网快速自愈，缩短配电网非故障区域停电时间，提高供电可靠性。

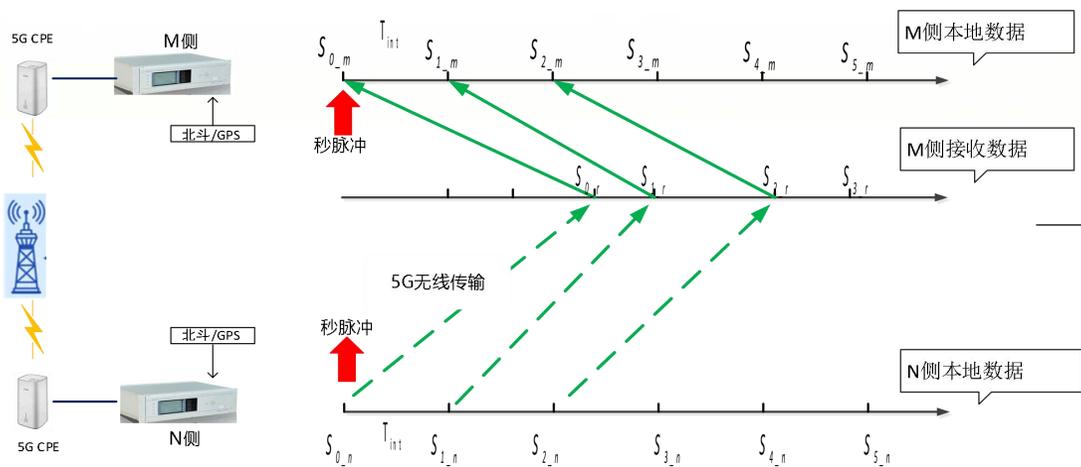


三、继电保护新技术探索

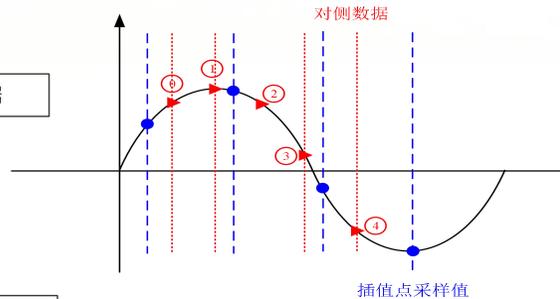
基于5G通信的配网故障快速隔离与自愈技术

- **5G差动保护数据同步技术**：基于绝对时标或采用双端电气量角差的数据同步技术，解决传统数据同步方法无法适应**5G网络双向时延不一致、时延较长、抖动较大**等问题。

基于外部时钟的同步技术

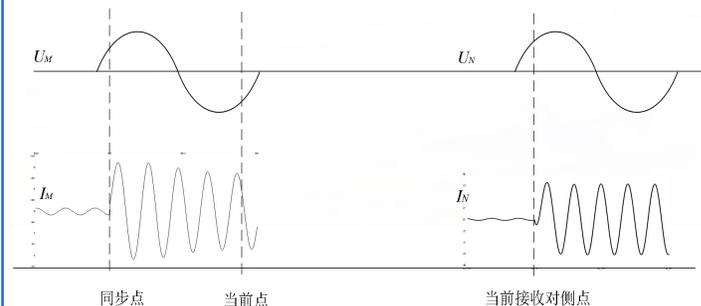


基于采样点序号同步方法

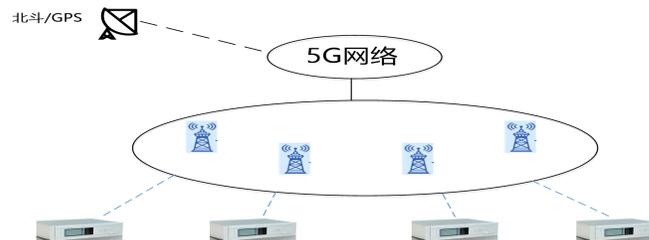


基于采样点插值同步方法

不依赖外部时钟的同步技术



基于电气量的数据同步技术



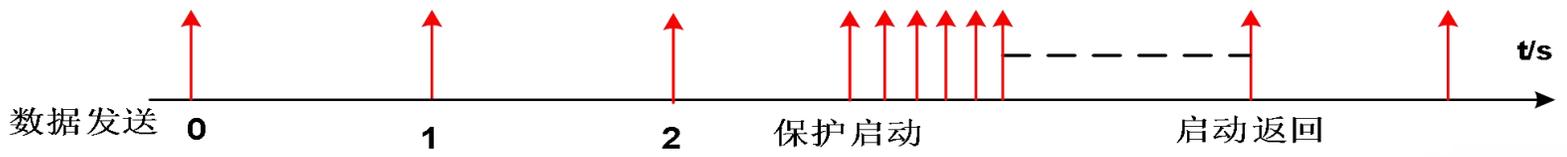
基于5G网络授时的数据同步技术

三、继电保护新技术探索

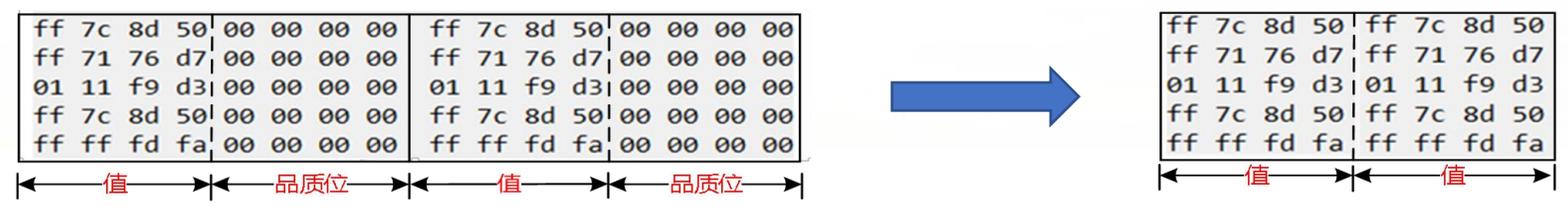
基于5G通信的配网故障快速隔离与自愈技术

5G差动保护数据流量控制技术

(1) 动态响应传输模式



(2) 帧结构优化



DA 6Byte	SA 6Byte	Length 2Byte	UDP Header 28Byte	SV Message 136Byte	Second 4Byte	ns 4Byte	FCS 4Byte
-------------	-------------	-----------------	-------------------------	-----------------------	-----------------	-------------	--------------

流控优化前
每月消耗流量约为550GB



流控优化后
每月消耗数据529MB

数据流量降至0.1%，通信资费大幅降低

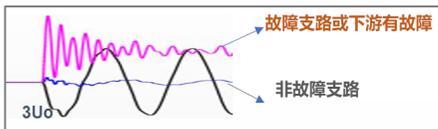
三、继电保护新技术探索

基于5G通信的配网故障快速隔离与自愈技术

- **单相接地故障检测技术：**构建零模分量时域频域信息相结合、CT极性在线校核自修正的单相接地故障检测技术，自适应于中性点不接地、经消弧线圈接地系统。

选线技术

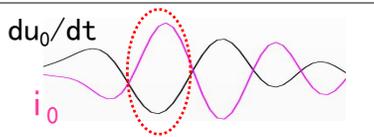
直流偏移量



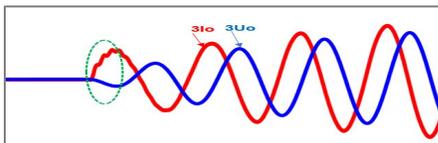
稳态工频零序方向

$$\theta_1 < \arg \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < \theta_2$$

高频暂态零序方向

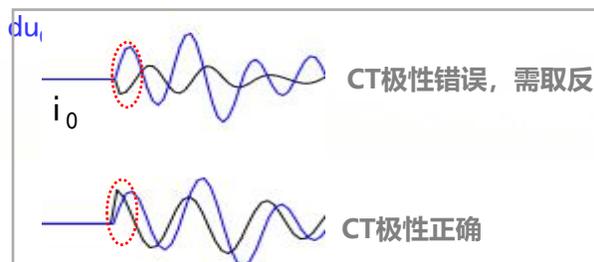


初始暂态零序方向

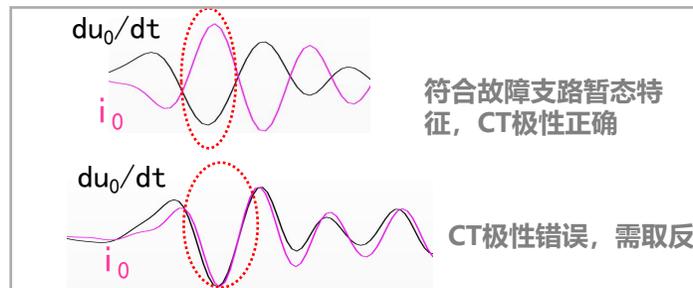


CT极性校核及修正技术

非暂态量最大支路

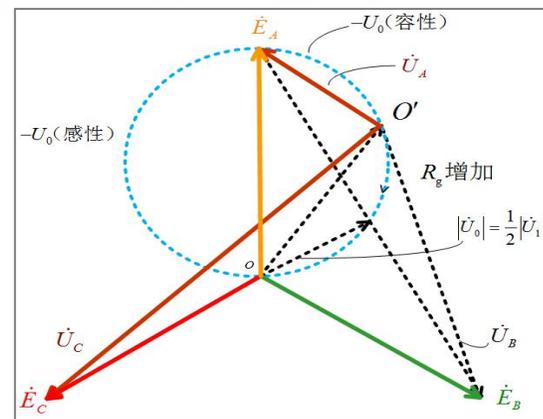


有偏移直流分量支路



选相技术

不接地和经消弧接地系统故障选相



一 新型电力系统形态

二 继电保护技术挑战

三 继电保护新技术探索

四 总结与展望

四、总结与展望

□ 总结

- 新能源电源和柔直的故障特征与传统同步机相比发生了**本质变化**，可分为四个阶段，其中：
暂态自然响应阶段故障特征不受电力电子控制策略影响；
控制器稳态控制阶段的控制目标决定电气量特征规律，新能源发电稳态故障电流相位较故障前体现滞后性，与电压跌落深度强相关。而柔直的控制策略努力维持原有输送功率，故障电流穿越特性更为明显，且与故障严重程度弱相关。
- 新能源电源和柔直故障穿越过程电源内电势变化，**颠覆了传统基于同步机特性的继电保护理论基础**；故障电流幅值受限和相角受控、等值序阻抗波动、频率偏移和谐波含量大等电气特征，造成传统保护灵敏度和可靠性降低。

□ 总结

- 差动保护仍将是各类设备的主保护。提出了**三区域差动保护方法**，通过增设模糊区提升灵敏度。
- **基于变压器主磁通估算的励磁涌流识别技术**，解决了正常运行故障时差动保护受谐波影响难以快速动作的问题。
- 线路距离保护受电力电子控制策略影响大，存在**故障方向判别、选相、助增**等三大难题。通过抓住故障初瞬不受电力电子设备控制策略影响的特征，动态调整距离继电器的动作特性，解决短路电流源与极化电压源不一致造成距离保护故障方向误判的问题。基于电压量的选相技术，解决了受控电源侧距离保护选相问题。
- 构建了多物理场多维特征的**大型电力变压器主动保护技术**，力图实现变压器早期严重缺陷和轻微故障辨识，提升设备安全运行水平。
- 就地布置分布式配电终端，通过**5G差动保护技术**、基于零模分量时频域和邻域信息的**单相接地故障识别技术**，实现了有源配电网快速故障隔离、区段定位和负荷转供，无需定值整定配合。

□ 展望

随着新型电力系统建设的不断演进，不同电源的聚合、新型输电方式的出现，故障规律分析和共性特征提取将更加困难，叠加运行方式灵活多变，构建适应新型电力系统的继电保护技术体系任重而道远。

- 1) **从“依赖”到“不依赖”**：以构建不依赖电源特性的保护原理为目标，强化主保护，寻找内部故障能表征被保护对象拓扑或参数变化的特征量，探索基于时域解析模型、暂态量特异性特征、被保护对象自然边界或构造边界的保护原理。
- 2) **从“被动”到“主动”**：利用电力电子设备可控性，在满足自身设备安全和系统稳定要求的前提下，为保护判别故障创造条件。研究通过电力电子设备**主动注入和检测特定频率、特定幅值的信号**，提升故障甄别的灵敏性和可靠性。探索**构网型控制模式**，为故障分析方法应用和故障正确判断创造有利条件。
- 3) 以故障形态**可模拟**、保护性能**可验证**为目标，研究新型电力系统各类试验场景构建及新型保护性能校核验证技术。

敬请各位专家批评指正!

谢 谢!